

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
Departamento de Ingeniería Química



TESIS DOCTORAL

**Efectos de la cubierta en la durabilidad de las geomembranas
poliméricas empleadas en la impermeabilización de embalses**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Rosario Solera Martinez

Directores

**Manuel Blanco Fernández
Francisca Castillo Rubí**

Madrid, 2018

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

Departamento de Ingeniería Química



**EFFECTOS DE LA CUBIERTA EN LA DURABILIDAD DE LAS
GEOMEMBRANAS POLIMÉRICAS EMPLEADAS EN LA
IMPERMEABILIZACIÓN DE EMBALSES**

**MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR**

Rosario Solera Martínez

Bajo la dirección de los doctores

**D. Manuel Blanco Fernández
D^a. Francisca Castillo Rubí**

Madrid, 2017

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
Departamento de Ingeniería Química



CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS
LABORATORIO CENTRAL DE ESTRUCTURAS Y MATERIALES



TESIS DOCTORAL

EFFECTOS DE LA CUBIERTA EN LA DURABILIDAD DE LAS
GEOMEMBRANAS POLIMÉRICAS EMPLEADAS EN LA
IMPERMEABILIZACIÓN DE EMBALSES

Rosario Solera Martínez

Directores

Dr. D. Manuel Blanco Fernández
Dra. D^a. Francisca Castillo Rubí

Madrid, 2017



El Dr. D. MANUEL BLANCO FERNÁNDEZ, Jefe del Área de Materiales, y la Dra. Dña. FRANCISCA CASTILLO RUBÍ, Coordinadora Técnica Científica del Área de Materiales del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) dependiente del Ministerio de Fomento y del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente

INFORMAN

Que el trabajo de investigación titulado "EFECTOS DE LA CUBIERTA EN LA DURABILIDAD DE LAS GEOMEMBRANAS POLIMÉRICAS EMPLEADAS EN LA IMPERMEABILIZACIÓN DE EMBALSES", ha sido realizado bajo su dirección en el Área de Materiales del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX, dentro de los proyectos que abarca este Organismo y que, a su juicio, reúne los requisitos de originalidad y rigor científico necesarios para ser presentada como Tesis Doctoral.

Los Directores de la Tesis

Dr. D. Manuel Blanco Fernández

Dra. Dña. Francisca Castillo Rubí

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer al Dr. D. Manuel Blanco y a la Dra. D^a. Francisca Castillo la dirección de esta Tesis Doctoral, por su dedicación y sobre todo por guiarme en el largo camino recorrido hasta ahora. Ha sido un verdadero honor para mí haber podido contar con la ayuda y el apoyo de los dos, en particular del Dr. D. Manuel Blanco, uno de los mayores expertos en el campo de la impermeabilización, por tener la suficiente paciencia para que este trabajo haya salido a la luz después de varios años de investigación. Agradecerle a la Dra. Castillo la confianza y cariño que me ha mostrado desde el primer día que llegué al Laboratorio Central así como su ánimo y aliento para que haya podido acabar y presentar esta Tesis.

Quiero agradecer al Dr. D. Arturo Romero Salvador, catedrático del departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense, su interés y dedicación prestada en la realización de esta Tesis Doctoral.

También dar las gracias al Dr. D. Juan Bautista Torregrosa Soler por su amabilidad e interés mostrado, aún en la distancia, como evaluador de esta Tesis.

Asimismo, quiero hacer extensivo el agradecimiento a D. José Manuel Gállico Estévez, Director del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX, por permitir el desarrollo de este trabajo. Igualmente, quiero darle las gracias por la concesión de la beca de investigación en el año 1991 que ha hecho posible mi formación en el campo de la impermeabilización y que ha dado como fruto la presentación de esta memoria.

El trabajo presentado en esta memoria ha sido posible gracias a la colaboración entre BALTEN y el CEDEX. En especial quiero agradecer a D. Escolástico Aguiar su inestimable interés en este trabajo de investigación y la amabilidad mostrada en todo momento, tanto en las islas como en la península. No quiero dejar de mencionar a D^a. Tatiana Vara por la ayuda prestada en las tareas relacionadas con este trabajo de investigación.

Agradecer también a las doctoras D^a. Gloria Rico y D^a. Lina Pargada de la Universidad Complutense de Madrid, por su participación en el análisis estructural de los plastificantes. En particular mi agradecimiento personal a las dos por haberme hecho partícipe de su confianza y amistad a lo largo de muchos años. A los doctores D. Jesús Soriano y D. Miguel Ángel García por realizar el estudio microscópico en todos los materiales estudiados en este trabajo. A D. Javier Burgos por su paciencia al enseñarme el método de trabajo y el funcionamiento de los equipos utilizados en el estudio microscópico.

También me gustaría agradecer a todas las personas que trabajan en otras Áreas del Laboratorio Central, la ayuda que me han prestado a la hora de resolver muchas dificultades y que han hecho muy agradable el día a día en el Laboratorio.

A todas las personas del departamento de Química Orgánica, porque me han enseñado como realizar todos los ensayos en las geomembranas, desde medir la densidad con el "difícil y complicado" picnómetro hasta entender los ensayos de tracción y alargamiento. Muchas gracias a los que ya no están y a los que permanecen en el Laboratorio, porque además de aprender muchas cosas con ellos, me han tratado siempre muy bien. A Fernando, Jesús y Bernardino por su extraordinaria ayuda. A Juan Manuel por su cordialidad y sentido del humor, a María Gracia por sus atenciones y a Sandra, porque me ha cuidado mucho estos últimos meses y sobre todo por su alegría permanente.

Quiero dar las gracias a Ascensión, una persona muy especial para mí. Ella me enseñó cómo realizar la extracción de plastificantes y los espectros de infrarrojo, además de transmitirme, con sus magníficas dotes comunicadoras, lo “bonito y satisfactorio” que es trabajar en un laboratorio. Desde mi primer día en el Laboratorio Central hasta hoy he ido aprendiendo mucho de ella en todos los aspectos, en el profesional, en el social y, sobre todo, en el aspecto humano y espero seguir aprendiendo de ella hasta que nos jubilemos.

Al resto de las personas que forman parte del Área de Materiales, en particular a Ángel Leiro por su permanente buen humor y a Beatriz por hacer muy agradable el tiempo compartido en la “andadura” recorrida para la redacción de nuestras Tesis.

De un modo especial quiero dar las gracias a mi amiga Vicky, que después de tantos años, su amistad ha sido una pieza fundamental para que yo haya podido, finalmente, presentar esta memoria.

Quiero dar las gracias a toda mi familia, la castellano-manchega y la madrileña, porque me quieren mucho y en especial, a Antonio y a la familia Alegre-Landáburu.

Necesitaría muchas páginas para agradecer a mis padres todo lo que han hecho por mí pero solo dispongo de unas líneas. Les doy las gracias por cuidarme tanto, en los momentos difíciles y en los más difíciles todavía, por animarme a estudiar y a seguir estudiando para llegar a donde estoy ahora. Sobre todo quiero agradecerles su ayuda por cuidar a mi familia, durante los últimos meses, para que yo pudiera terminar esta Tesis.

En último lugar, y el más importante, quiero dar las gracias a Landa, Daniel y Raúl por la paciencia que han tenido, porque se han portado como unos campeones en todo este tiempo que he estado “ausente” de sus vidas.

Y a Landa, especialmente, porque no me imagino la vida sin él.

A mis padres

A Landa, Daniel y Raúl

ÍNDICE

RESUMEN	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. MATERIALES GEOSINTÉTICOS EN INGENIERÍA CIVIL	9
1.2. EXPERIENCIA ESPAÑOLA EN LA IMPERMEABILIZACIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS.....	10
1.3. MARCO CLIMÁTICO EN LA ISLA DE TENERIFE.....	13
1.4. SISTEMAS PARA EVITAR LA EVAPORACIÓN	15
1.5. SEGUIMIENTO DE LAS GEOMEMBRANAS EN OBRA	21
1.5.1. TOMA DE MUESTRAS	21
1.6. PATOLOGÍAS DE LAS GEOMEMBRANAS	26
1.7. TRABAJOS PREVIOS DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN DEL CEDEX	28
1.8. OBJETO Y ALCANCE DEL TRABAJO	29
1.9. BIBLIOGRAFÍA.....	31
CAPÍTULO 2. MATERIALES POLIMÉRICOS	37
2.1. MATERIALES POLIMÉRICOS	37
2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES POLIMÉRICOS EMPLEADOS COMO GEOMEMBRANAS.....	38
2.3. TIPOS DE GEOMEMBRANAS POLIMÉRICAS	42
2.4. REQUERIMIENTOS EXIGIBLES A LAS GEOMEMBRANAS	42
2.4.1. MECÁNICOS	43
2.4.2. TÉRMICOS	43
2.4.3. DURABILIDAD	44
2.4.4. OTRAS CARACTERÍSTICAS.....	44
2.5. GEOMEMBRANAS DE POLIETILENO	49
2.5.1 ADITIVOS.....	51
2.5.2. FABRICACIÓN DE LAS GEOMEMBRANAS DE PEAD.....	52
2.5.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS GEOMEMBRANAS DE PEAD.....	53
2.5.4. DEGRADACIÓN DE LAS GEOMEMBRANAS DE PEAD.....	54
2.6. GEOMEMBRANAS DE EPDM	57
2.6.1. ADITIVOS	60
2.6.2. FABRICACIÓN DE LAS GEOMEMBRANAS DE EPDM.....	62
2.6.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS GEOMEMBRANAS DE EPDM	62
2.6.4. DEGRADACIÓN DE LAS GEOMEMBRANAS DE EPDM.....	63
2.7. GEOMEMBRANA DE POLI(CLORURO DE VINILO)	64

2.7.1. EL PVC COMO POLIMERO	64
2.7.2. ADITIVOS.....	67
2.7.2.1. Cargas y pigmentos.....	67
2.7.2. 2. Retardantes de llama	68
2.7.2.3. Lubricantes	68
2.7.2.4. Estabilizantes.....	68
2.7.2.5. Estabilizantes térmicos.....	69
2.7.2.6. Estabilizantes ultravioleta.....	70
2.7.2.7. Plastificantes	70
2.7.2.7.1. Teorías de la plastificación.....	72
2.7.2.7. 2. Tipos de plastificantes.....	74
2.7.3. FABRICACION DE GEOMEMBRANAS	77
2.7.4. DURABILIDAD DE LAS GEOMEMBRANAS DE PVC	79
2.7.4.1. Pérdida de plastificantes.....	79
2.7.4.2. Migración del plastificante al aire.....	79
2.7.4.3. Migración del plastificante a líquidos.....	81
2.7.4.4. Migración del plastificante a un sólido.....	82
2.7.5. Factores que controlan la retención del plastificante	84
2.7.5.1. Peso molecular del plastificante	84
2.7.5.2. Linealidad del plastificante	87
2.7.6. DEGRADACION TÉRMICA.....	87
2.7.7. DEGRADACION ULTRAVIOLETA.....	88
2.8. BIBLIOGRAFIA.....	90
CAPITULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	101
3.1. NORMATIVA ESPAÑOLA Y EUROPEA	101
<i>Normativa Vigente Europea.....</i>	<i>102</i>
<i>Normativa Vigente Española</i>	<i>103</i>
<i>Normativa empleada anterior al año 2005</i>	<i>103</i>
3.2. TOMA DE MUESTRAS EN LA Balsa de El Saltadero y El Campo EXPERIMENTAL.....	104
3.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS.....	105
3.3.1. ESPESOR	105
3.3.2. DOBLADO A Bajas Temperaturas.....	106
3.3.3. RESISTENCIA AL IMPACTO DINAMICO.....	108

3.3.4. CONTENIDO EN PLASTIFICANTES.....	110
3.4. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	111
3.4.1. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y ALARGAMIENTO.....	112
3.4.2. RESISTENCIA AL IMPACTO ESTÁTICO.....	116
3.4.3. RESISTENCIA DE LA SOLDADURA	120
3.5. ESTUDIO MICROSCÓPICO	121
3.5.1. MICROSCOPIA ÓPTICA DE REFLEXIÓN	122
3.5.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	123
3.6. TÉCNICAS INSTRUMENTALES.....	124
3.6.1. ESPECTROSCOPIA INFRARROJA	124
3.6.2. CROMATOGRAFIA DE GASES ACOPLADA CON ESPECTOMETRIA DE MASAS	125
3.7. OTRAS CARACTERÍSTICAS.....	126
3.7.1. DUREZA SHORE-A.....	126
3.7.2. AGRIETAMIENTO POR ESFUERZOS MEDIOAMBIENTALES “STRESS CRACKING”	127
3.7.3. TIEMPO DE INDUCCIÓN A LA OXIDACIÓN	128
3.8. BIBLIOGRAFIA.....	129
CAPÍTULO 4. RESULTADOS DE LA GEOMEMBRANA DE PVC-P INSTALADA EN LA Balsa de El Saltadero	137
4.1. DESCRIPCIÓN DE LA Balsa de El Saltadero	137
4.2. CARACTERÍSTICAS DE LA COBERTURA DE SOMBREO SUSPENDIDA	138
4.3. CLIMATOLOGIA DE LA ISLA DE TENERIFE	141
4.4. MUESTRAS EXTRAIDAS DE LA Balsa.....	143
4.5. EXPERIMENTAL.....	144
4.5.1. CARACTERÍSTICAS FISICO-QUÍMICAS	144
4.5.1.1. ESPESOR.....	144
4.5.1.2. DOBLADO A Bajas Temperaturas.....	145
4.5.1.3. RESISTENCIA AL IMPACTO DINAMICO	146
4.5.1.4. CONTENIDO EN PLASTIFICANTES.....	146
4.5.2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	151
4.5.2.1. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y ALARGAMIENTO.....	151
4.5.2.1. RESISTENCIA AL IMPACTO ESTÁTICO	154
4.5.2.3. RESISTENCIA DE LA SOLDADURA	158

4.5.3. ESTUDIO MICROSCÓPICO	160
4.5.3.1. MICROSCOPIA ÓPTICA DE REFLEXIÓN.....	160
4.5.3.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	162
4.5.4. TÉCNICAS INSTRUMENTALES.....	173
4.5.4.1. DETERMINACIÓN DE LOS GRUPOS FUNCIONALES DE LOS PLASTIFICANTES POR ESPECTROSCOPIA INFRARROJA	174
4.5.4.2. ESTUDIO DE LOS PLASTIFICANTES MEDIANTE CROMATOGRAFIA DE GASES ACOPLADA CON ESPECTROMETRIA DE MASAS	175
4.5.4.3. CALCULO DEL PESO MOLECULAR DEL PLASTIFICANTE	185
4.6. DEGRADACIÓN DE LA GEOMEMBRANA DE PVC.....	186
4.6.1. PÉRDIDA DE PLASTIFICANTES.....	187
4.7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	192
4.7.1. EVOLUCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS	192
4.8. BIBLIOGRAFIA.....	199
CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LA GEOMEMBRANA DE PVC INSTALADA EN EL CAMPO EXPERIMENTAL DE LA Balsa de El Saltadero	205
5.1. DESCRIPCIÓN DEL CAMPO EXPERIMENTAL.....	205
5.2. MUESTRAS EXTRAIDAS DEL CAMPO EXPERIMENTAL	207
5.3. EXPERIMENTAL.....	208
5.3.1. CARACTERISTICAS FISICO-QUIMICAS	208
5.3.1.1. ESPESOR.....	208
5.3.1.2. DOBLADO A BAJAS TEMPERATURAS.....	208
5.3.1.3. RESISTENCIA AL IMPACTO DINAMICO	209
5.3.1.4. CONTENIDO EN PLASTIFICANTES.....	209
5.3.2. CARACTERISTICAS MECÁNICAS	211
5.3.2.1. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y ALARGAMIENTO.....	211
5.3.2.2. RESISTENCIA AL IMPACTO ESTÁTICO	212
5.3.2.3. RESISTENCIA DE LA SOLDADURA	214
5.3.3. ESTUDIO MICROSCÓPICO	215
5.3.3.1. MICROSCOPIA ÓPTICA DE REFLEXIÓN.....	215
5.3.3.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	219
5.4. DEGRADACIÓN DE LA GEOMEMBRANA DE PVC.....	222
5.4.1. PERDIDA DE PLASTIFICANTES.....	222
5.5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	224

5.5.1. EVOLUCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS	225
5.6. BIBLIOGRAFIA.....	227
CAPÍTULO 6. ESTUDIO COMPARATIVO DE LA GEOMEMBRANA DE PVC-P INSTALADA EN LA Balsa DE EL Saltadero Y EN EL CAMPO EXPERIMENTAL.....	233
6.1. INTRODUCCIÓN	233
6.2. ESTUDIO DE LA DEGRADACIÓN DE LAS GEOMEMBRANAS DE PVC	233
6.2.1. PÉRDIDA DE PLASTIFICANTES.....	233
6.2.2. ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS.....	238
6.2.2.1. ESPESOR.....	238
6.2.2.2. DOBLADO A Bajas Temperaturas.....	238
6.2.2.3. RESISTENCIA AL IMPACTO DINAMICO	238
6.2.2.4. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y ALARGAMIENTO.....	239
6.2.2.5. RESISTENCIA A LA PERFORACIÓN Y RECORRIDO DEL PUNZÓN ANTES DE LA PERFORACIÓN	241
6.2.2.6. RESISTENCIA DE LA SOLDADURA	244
6.2.2.7. MICROSCOPIA ÓPTICA Y ELECTRÓNICA.....	245
6.3. CONCLUSIONES.....	248
6.4. BIBLIOGRAFIA.....	249
CAPÍTULO 7. OTROS MATERIALES.....	253
7.1. INTRODUCCIÓN	253
7.2. LAS GEOMEMBRANAS Y LOS EMBALSES	253
7.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	255
7.4. GEOMEMBRANAS DE EPDM	256
7.5. GEOMEMBRANAS DE PEAD	259
7.6. CONCLUSIONES.....	262
7.6.1. GEOMEMBRANAS DE EPDM	263
7.6.2. GEOMEMBRANAS DE PEAD	263
7.7. BIBLIOGRAFIA.....	263
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES.....	269

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	9
Figura 1.1. Tenerife en su entorno geográfico.....	14
Figura 1.2. Máximo índice UV diario en tiempo despejado	15
Figura 1.3. Esquema de los dos métodos más usuales para la cubierta de balsas de almacenamiento de agua	18
Figura 1.4. Cubierta de la balsa de El Saltadero.....	19
Figura 1.5. Vista panorámica del interior de la balsa de El Saltadero	19
Figura 1.6. Vista panorámica de la balsa de Valle de San Lorenzo	20
Figura 1.7. Vista panorámica de la balsa de Ravelo.....	20
Figura 1.8. Toma de muestras. Balsa de El Saltadero	22
Figura 1.9. Extracción de muestras con soldadura de la balsa de El Saltadero.....	22
Figura 1.10. Reposición de la geomembrana después de la extracción de muestras	23
Figura 1.11. Probetario para la extracción de muestras en la balsa	24
Figura 1.12. Vista panorámica de los probetarios de la balsa de El Saltadero	25
Figura 1.13. Probetario.....	25
Figura 1.14. Probetario visto desde la cubierta de la balsa.....	25
 CAPÍTULO 2. MATERIALES POLIMÉRICOS	37
Figura 2.1. Unidad monomérica del polietileno	49
Figura 2.2. Representación esquemática de una extrusora de husillo sencillo	53
Figura 2.3. Relación entre la densidad del polietileno y sus propiedades.....	54
Figura 2.4. Mecanismo de rotura de las cadenas macromoleculares en el PEAD.	56
Figura 2.5. Ciclos de oxidación en el polietileno	57
Figura 2.6. 5-Vinil-2-norborneno (VNB).....	58
Figura 2.7. Diciclopentadieno (DCPD).	58
Figura 2.8. 5-etiliden-2-norborneno (ENB).	58
Figura 2.9. 1,4-Hexadieno.	58
Figura 2.10. Estructura química del EPDM con 5-etiliden-2-norborneno.	59
Figura 2.11. Recombinación de radicales libres en la escisión de cadenas	64

Figura 2.12. Secuencia monomérica del poli(cloruro de vinilo)	66
Figura 2.13. Representación tridimensional del ftalato de dioctilo.....	71
Figura 2.14. Representación tridimensional de la macromolécula de PVC.	71
Figura 2.15. Interacción Polímero-Plastificante y efecto pantalla de la cadena alifática del plastificante	74
Figura 2.16. Relación entre el peso molecular del plastificante y su pérdida por volatilización	85
Figura 2.17. Relación entre el peso molecular del plastificante y su pérdida por extracción por agua.	85
Figura 2.18. Relación entre el peso molecular del plastificante y su migración a una espuma de poliuretano	86
Figura. 2.19. Deshidrocloración del poli(cloruro de vinilo).	88
Figura 2.20. Espectro visible y UV de la radiación solar.....	89
CAPITULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	101
Figura 3.1. Microscopio Mitutoyo	106
Figura 3.2. Probeta de la zona intermedia de la balsa El Saltadero.Cara externa.....	108
Figura 3.3. Probeta de la zona intermedia de balsa El Saltadero.Cara interna	108
Figura 3.4. Equipo de resistencia al impacto	109
Figura 3.5. Prueba de estanquidad sobre la probeta ensayada.....	110
Figura 3.6. Equipo de extracción automática Soxtec Avanti 2050 de la firma FOSS TECATOR.....	111
Figura 3.7. Máquina universal de la compañía INSTRON mod.1195.....	114
Figura 3.8. Máquina universal de la compañía INSTRON mod.5569.....	114
Figura 3.9. Probeta Halterio.....	115
Figura 3.10. Probeta rectangular	115
Figura 3.11. Ensayo de tracción en probetas con geometría rectangular. Mordazas neumáticas de 10KN.....	116
Figura 3.12. Detalle de la rotura en la probeta de PVC-P reforzado con tejido	116
Figura 3.13. Vástago cilíndrico perforante y dispositivo de alineación	117
Figura 3.14. Tipos de rotura observados en el ensayo de perforación.	118
Figura 3.15. Accesorio para determinar la resistencia a la perforación.....	119
Figura 3.16. Probeta perforada. Muestra de la Balsa de El Saltadero extraída a los 14 años de instalación de la geomembrana.....	119
Figura 3.17. Probeta para ensayar la soldadura por tracción	120

Figura 3.18. Probeta para ensayar la soldadura por pelado	121
Figura 3.19. Microscopio Leica DMRX.....	122
Figura 3.20. Microscopio electrónico EVO 50.....	123
Figura 3.21. Metalizadora EMITECH.....	124
Figura 3.22. Durómetro Shore ZWICK	127
Figura 3.23. Equipo para la determinación del “stress cracking”	128

CAPÍTULO 4. RESULTADOS DE LA GEOMEMBRANA DE PVC-P

INSTALADA EN LA Balsa DE EL Saltadero	137
Figura 4.1. Vista panorámica de la balsa de El Saltadero	139
Figura 4.2. Vista del interior de la balsa de El Saltadero.	140
Figura 4.3. Detalle de la cobertura de sombreado suspendida de El Saltadero. Exterior ..	140
Figura 4.4. Detalle de la cobertura de sombreado suspendida de El Saltadero. Interior ...	140
Figura 4.5. Balsa de El Saltadero. Zonas de extracción de muestras.....	143
Figura 4.6. Evolución del espesor en el talud norte a lo largo del tiempo.....	144
Figura 4.7. Evolución del espesor en el talud sur a lo largo del tiempo	145
Figura 4.8. Evolución del contenido en plastificantes en el talud norte a lo largo del tiempo.....	148
Figura 4.9. Evolución del contenido en plastificantes en el talud sur a lo largo del tiempo	150
Figura 4.10. Evolución de la resistencia a la tracción en el punto de carga máxima en el talud norte a lo largo del tiempo	152
Figura 4.11. Evolución de la resistencia a la tracción en el punto de carga máxima en el talud sur a lo largo del tiempo	152
Figura 4.12. Evolución del alargamiento en el punto de carga máxima en el talud norte a lo largo del tiempo.....	153
Figura 4.13. Evolución del alargamiento en el punto de carga máxima en el talud sur a lo largo del tiempo	154
Figura 4.14. Evolución de la resistencia a la perforación en el talud norte a lo largo del tiempo.....	155
Figura 4.15. Evolución de la resistencia a la perforación en el talud sur a lo largo del tiempo.....	156
Figura 4.16. Evolución del recorrido del punzón en el talud norte a lo largo del tiempo.....	157

Figura 4.17. Evolución del recorrido del punzón en el talud sur a lo largo del tiempo.....	157
Figura 4.18. Evolución de la resistencia de la soldadura por tracción y pelado en las muestras del talud norte coronación	159
Figura 4.19. Evolución de la resistencia de la soldadura por tracción y pelado en las muestras del talud sur coronación	159
Figura 4.20. Microfotografías de MOR a 60x del talud norte coronación a diferentes años de instalación de la geomembrana.....	160
Figura 4.21. Microfotografías MOR a 60x del talud sur coronación a diferentes años de instalación de la geomembrana.....	161
Figura 4.22. Microfotografías de MEB a 90x del talud norte coronación a diferentes años de instalación de la geomembrana.....	163
Figura 4.23. Microfotografías de MEB a 900x del talud norte coronación a diferentes años de instalación de la geomembrana.....	165
Figura 4.24. Microfotografías de MEB a 90x del talud norte, zona intermedia, a diferentes años de instalación de la geomembrana.....	166
Figura 4.25. Microfotografías de MEB 900x del talud norte, zona intermedia, a diferentes años de instalación de la geomembrana.....	167
Figura 4.26. Microfotografías MEB de la muestra extraída del fondo a los 13 años de su instalación. Cara externa.	168
Figura 4.27. Microfotografías MEB de la muestra extraída del fondo a los 7 años de su instalación. Cara interna.	168
Figura 4.28. Microfotografías de MEB a 90x del talud sur coronación a diferentes años de instalación de la geomembrana.....	169
Figura 4.29. Microfotografías de MEB a 900x del talud sur coronación a diferentes años de instalación de la geomembrana.....	171
Figura 4.30. Microfotografías de MEB a 90x del talud sur zona intermedia a los 13 y 16 años de instalación de la geomembrana.....	172
Figura 4.31. Microfotografías de MEB 900x del talud sur zona intermedia a los 13 y 16 años de instalación de la geomembrana.....	173
Figura 4.32. Estructura química general de los ftalatos de alquilo	174
Figura 4.33. Cromatograma del plastificante de la geomembrana de PVC-P de la balsa de El Saltadero.	176
Figura 4.34. Espectro de masas del pico de retención a 57.60 min.	176

Figura 4.35. Estructura química del ftalato de bis (2-etilhexilo).	177
Figura 4.36. Espectro de masas del ftalato de diisodecilo.	178
Figura 4.37. Estructura química del ftalato de diisodecilo.	179
Figura 4.38. Espectro de masas del ftalato de isodecilnonilo.	179
Figura 4.39. Estructura química del ftalato de isodecilnonilo.	180
Figura 4.40. Espectro de masas del ftalato de didecilo.	181
Figura 4.41. Estructura química del ftalato de didecilo.	181
Figura 4.42. Espectro de masas del ftalato de isodecilundecilo.	182
Figura 4.43. Estructura química del ftalato de isodecilundecilo.	183
Figura 4.44. Espectro de masas del ftalato de diundecilo.	183
Figura 4.45. Estructura química del ftalato de diundecilo.	184
Figura 4.46. Ftalato de didecilo.	185
Figura 4.47. Ftalato de isodecilundecilo.	185
Figura 4.48. Contenido y pérdida de plastificantes en el talud norte de la balsa de El Saltadero.	188
Figura 4.49. Contenido y pérdida de plastificantes en el talud sur de la balsa de El Saltadero.	189
Figura 4.50. Pérdida de plastificantes en los taludes norte y sur de la balsa de El Saltadero.	190
CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LA GEOMEMBRANA DE PVC INSTALADA EN EL CAMPO EXPERIMENTAL DE LA Balsa DE EL SALTADERO	
Figura 5.1. Situación del campo experimental en el recinto de la balsa de El Saltadero.	205
Figura 5.2. Seguimiento de las geomembranas en el campo experimental en la balsa de El Saltadero.	206
Figura 5.3. Evolución del espesor en la geomembrana del campo experimental en función del tiempo.	208
Figura 5.4. Evolución del contenido en plastificantes en la geomembrana del campo experimental en función del tiempo.	211
Figura 5.5. Evolución de la resistencia a la tracción en el punto de carga máxima en función del tiempo.	212
Figura 5.6. Evolución del alargamiento en el punto de carga máxima en función del tiempo.	212

Figura 5.7. Evolución de la resistencia a la perforación en la muestra del campo experimental en función del tiempo.	213
Figura 5.8. Evolución del recorrido del punzón en función del tiempo.....	214
Figura 5.9. Evolución de la resistencia de la soldadura por tracción y pelado en la muestra del campo experimental.	215
Figura 5.10. Microfotografías MOR a 60x de la cara externa e interna de la geomembrana a los 6 años desde su instalación.	216
Figura 5.11. Microscopía MOR a 60x de la geomembrana del campo experimental realizada en ambas caras de la geomembrana desde los 11 a los 13 años de su puesta en obra.....	217
Figura 5.12. Microscopía MOR a 60x de la geomembrana del campo experimental realizada en ambas caras de la geomembrana desde los 14 a 16 años de su puesta en obra.	218
Figura 5.13. Microfotografías MEB a 90x y 900x de la cara externa de la geomembrana a los 6 años de su puesta en obra.....	219
Figura 5.14. Microfotografías MEB a 90x y 900x de la cara externa de la geomembrana a los 11, 12 y 13 años de su puesta en obra.	220
Figura 5.15. Microfotografías MEB a 90x y 900x de la cara externa de la geomembrana a los 14, 15 y 16 años de su puesta en obra.....	221
Figura 5.16. Contenido y pérdida de plastificantes en la geomembrana del campo experimental.....	223
CAPÍTULO 6. ESTUDIO COMPARATIVO DE LA GEOMEMBRANA DE PVC-P	
INSTALADA EN LA Balsa DE EL SALTADERO	
Y EN EL CAMPO EXPERIMENTAL.....	233
Figura 6.1. Evolución del contenido en plastificantes de la geomembrana de la balsa de El Saltadero, talud norte, y del campo experimental.	235
Figura 6.2. Evolución del contenido en plastificantes de la geomembrana de la balsa de El Saltadero, talud norte y sur, y del campo experimental.	236
Figura 6.3. Pérdida de plastificantes del talud norte de la balsa de El Saltadero y del campo experimental.	237
Figura 6.4. Pérdida de plastificantes en los dos taludes de la balsa de El Saltadero y del campo experimental.	237
Figura 6.5. Resistencia a la tracción de la geomembrana de la balsa de El Saltadero y el campo experimental	239

Figura 6.6. Alargamiento en la carga máxima en la balsa de El Saltadero y el campo experimental.	240
Figura 6.7. Evolución de la resistencia a la perforación en la balsa de El Saltadero y en el campo experimental.	242
Figura 6.8. Evolución del recorrido del punzón en la balsa de El Saltadero y en el campo experimental.	242
Figura 6.9. Evolución de la resistencia de la soldadura en la balsa de El Saltadero y en el campo experimental.	244
Figura 6.10. Microfotografías MOR 60x de las geomembranas de la balsa de El Saltadero y del campo experimental a diferentes años.....	246
Figura 6.11. Microfotografías MEB 900x de la balsa de El Saltadero y del campo experimental a diferentes años	247
CAPÍTULO 7. OTROS MATERIALES.....	253
Figura 7.1. Vista panorámica del embalse de Ravelo.	254
Figura 7.2. Vista panorámica del embalse de San Lorenzo.....	255
Figura 7.3. Microfotografías MOR 60x de la cara externa de las geomembranas de Los Dos Pinos y Ravelo.....	258
Figura 7.4. Microfotografías MEB a 90x y 900x de la cara externa de las geomembranas de Los Dos Pinos y Ravelo.	258
Figura 7.5. Evolución de las características de tracción y alargamiento a lo largo del tiempo de las geomembranas de Cuatro Caminos (CC) y San Lorenzo (SL).....	259
Figura 7.6. Evolución de la resistencia a la perforación y recorrido del punzón antes de perforar a lo largo del tiempo de las geomembranas de Cuatro Caminos (CC) y San Lorenzo (SL).....	260
Figura 7.7. Microfotografías MOR a 60x de la cara externa de las geomembranas de Cuatro Caminos (CC) y San Lorenzo (SL).....	261
Figura 7.8. Microfotografías MEB a 90x y 900x de la cara externa de las geomembranas de Cuatro Caminos (CC) y San Lorenzo (SL).....	262

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	9
Tabla 1.1. Referencias del empleo de geosintéticos en embalses 1990-1996	10
 CAPÍTULO 2. MATERIALES POLIMÉRICOS	37
Tabla 2.1. Materiales poliméricos empleados en la impermeabilización con geomembranas	39
Tabla 2.2. Composición de geomembranas empleadas en impermeabilización.	40
Tabla 2.3. Tipo de aditivos empleados en los materiales poliméricos.	41
Tabla 2.4. Valoración de las características para distintos materiales	46
Tabla 2.5. Geomembranas sintéticas utilizadas en impermeabilización en el año 1996. Datos expresados en m ²	47
Tabla 2.6. Valores mínimos exigibles a las geomembranas de PVC-P reforzado	48
Tabla 2.7. Valores mínimos exigibles a las geomembranas homogéneas de PEAD y EPDM.	48
Tabla 2.8. Formulación de una geomembrana de PEAD	51
Tabla 2.9. Formulación de una geomembrana de EPDM.	60
Tabla 2.10. Aditivos de las geomembranas de EPDM.	61
Tabla 2.11. Familias de plastificantes más frecuentes	75
Tabla 2.12. Ftalatos encontrados en las geomembranas estudiadas en el CEDEX.	76
Tabla 2.13. Formulación de una geomembrana de PVC-P.	78
Tabla 2.14. Propiedades de los plastificantes más comunes	81
Tabla 2.15. Contenido en plastificantes inicial y a los 8.5 años	83
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	101
Tabla 3.1. Temperaturas del ensayo de doblado a bajas temperaturas en diferentes geomembranas	107
CAPÍTULO 4. RESULTADOS DE LA GEOMEMBRANA DE PVC-P INSTALADA EN LA Balsa de El Saltadero	137
Tabla 4.1. Valores climatológicos medios del Aeropuerto Tenerife Sur (1981-2010)	142
Tabla 4.2. Valores climatológicos de la estación de las Galletas	142
Tabla 4.3. Resultados del doblado a -20°C en la muestras del talud norte y sur a diferentes profundidades.	146

Tabla 4.4. Contenido en plastificantes del talud norte coronación en función del tiempo.....	147
Tabla 4.5. Contenido en plastificantes del talud sur coronación en función del tiempo.....	149
Tabla 4.6. Contenido en plastificantes del material extraído del fondo en función del tiempo.....	150
Tabla 4.7. Longitudes de onda características de los ftalatos de alquilo.....	174
Tabla 4.8. Fragmentaciones correspondientes al pico 57.60 min.	177
Tabla 4.9. Fragmentaciones del pico de retención a 83.56 min.	178
Tabla 4.10. Fragmentaciones del pico de retención a 90.23 min.	180
Tabla 4.11. Fragmentaciones del pico de retención a 96.37 min.	181
Tabla 4.12. Fragmentaciones del pico de retención a 102.24 min.	182
Tabla 4.13. Fragmentaciones del pico de retención a 107.77 min.	184
Tabla 4.14. Datos de la pérdida de plastificantes a los 17 años en la balsa de El Saltadero.	189
Tabla 4.15. Datos de la resistencia a la tracción y alargamiento en la carga máxima a los 15 años desde la instalación de la geomembrana.	195
Tabla 4.16. Datos de la resistencia a la perforación y del recorrido del punzón antes de perforar a los 15 años desde la instalación de la geomembrana	197
CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LA GEOMEMBRANA DE PVC INSTALADA EN EL CAMPO EXPERIMENTAL DE LA Balsa DE EL SALTADERO	205
Tabla 5.1. Contenido en plastificantes de la geomembrana del campo experimental en función del tiempo.....	210
CAPÍTULO 6. ESTUDIO COMPARATIVO DE LA GEOMEMBRANA DE PVC-P INSTALADA EN LA Balsa DE EL SALTADERO Y EN EL CAMPO EXPERIMENTAL.....	233
Tabla 6.1. Contenido en plastificantes en las dos geomembranas de PVC	234
Tabla 6.2. Datos de la resistencia a la tracción y alargamiento en la carga máxima de la geomembrana del campo experimental y de la balsa de El Saltadero los 15 años.	241
Tabla 6.3. Datos de la resistencia a la perforación y recorrido del punzón antes de perforar, de la geomembrana del campo experimental y de la balsa de El Saltadero los 15 años.....	243

CAPÍTULO 7. OTROS MATERIALES.....	253
Tabla 7.1. Evolución de las características de las balsas de geomembranas de EPDM en los embalses de Los Dos Pinos y Ravelo a lo largo del tiempo.	257
Tabla 7.2. Datos de Stress Cracking y Tiempo de Inducción a la Oxidación (TIO) después de 23 años de instalación	261

ÍNDICE DE ECUACIONES

CAPÍTULO 2. MATERIALES POLIMÉRICOS.....	37
Ecuación 2.1. Cálculo de la pérdida de plastificantes según Giroud	79
CAPITULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	101
Ecuación 3.1. Resistencia en la carga máxima	113
Ecuación 3.2. Alargamiento en la carga máxima.....	113
CAPÍTULO 4. RESULTADOS DE LA GEOMEMBRANA DE PVC-P INSTALADA EN LA BALSA DE EL SALTADERO	137
Ecuación 4.1. Cálculo del peso molecular medio de los plastificantes.....	186
Ecuación 4.2. Cálculo de la pérdida de plastificantes según Giroud	187

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

La utilización de geomembranas sintéticas en el campo de las Obras Hidráulicas surge en España en los años 1970 en el sudeste peninsular, concretamente en la zona de Ibi, en la provincia de Alicante. Las primeras geomembranas instaladas estaban constituidas por materiales elastoméricos de caucho butilo (IIR). Posteriormente surgieron nuevos materiales como el poli(cloruro de vinilo) plastificado (PVC-P), polietileno de alta densidad (PEAD) y el caucho terpolímero de etileno-propileno-dieno (EPDM) que han conseguido situarse como los materiales más empleados a nivel mundial, en la impermeabilización de embalses.

Uno de los hechos que favoreció la introducción y expansión de las geomembranas de PVC-P en nuestro país, fue el desarrollo del Plan Hidráulico de la Comunidad Autónoma de Canarias en los años 80 del siglo pasado. En los años 90, el organismo autónomo local, Balsas de Tenerife (BALTEN), inició la colaboración con el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) con el propósito de estudiar el comportamiento de las geomembranas de PVC-P, instaladas en los primeros embalses construidos en la isla de Tenerife, siendo uno de ellos el embalse de El Saltadero, situado en el sur de la isla.

Posteriormente se proyectó la construcción de un campo experimental dentro del recinto del embalse de El Saltadero, con el fin de instalar nuevos materiales poliméricos y otros, que sin ser nuevos, su comportamiento a la intemperie era desconocido en nuestro país. Dicho campo experimental está orientado hacia el sur, ubicación que recibe mayor radiación procedente del sol en el hemisferio norte y debido a que es la situación más favorable para acelerar la degradación de los materiales poliméricos.

El embalse de El Saltadero está cubierto con una malla de polietileno de color negro sustentada por cordones de poliamida de alta resistencia. La instalación de esta cobertura de sombreado se consideró beneficiosa para reducir la evaporación y la formación de algas en las largas temporadas de almacenamiento de agua. Asimismo, se consideró útil para proteger la geomembrana de PVC-P de la radiación procedente del sol.

OBJETO DEL TRABAJO

El trabajo de investigación presentado en esta memoria se ha centrado en el estudio de los efectos que tiene la cobertura de sombreo sobre la geomembrana de PVC-P instalada en el embalse cubierto de El Saltadero.

Con objeto de conocer los efectos de la cobertura de sombreo, se ha procedido a estudiar el comportamiento de la misma geomembrana de PVC-P pero instalada a la intemperie, en el campo experimental situado en el recinto del embalse de El Saltadero.

Igualmente se ha procedido al estudio comparativo entre las geomembranas de PEAD instaladas en la balsa cubierta de San Lorenzo y en la de Cuatro Caminos, sin cubrir, y las geomembranas de EPDM instaladas en la balsa cubierta de Ravelo y en la de Los Dos Pinos, sin cubrir.

METODOLOGÍA

El estudio del comportamiento de las dos geomembranas de PVC-P se ha realizado mediante la determinación de las siguientes características físico-químicas: espesor de la geomembrana, doblado a bajas temperaturas, resistencia al impacto dinámico y contenido en plastificantes; así como las características mecánicas de resistencia a la tracción, alargamiento en la carga máxima, resistencia a la perforación y recorrido del punzón antes de la perforación y resistencia de la soldadura. Esta caracterización se ha llevado a cabo según lo indicado en la normativa europea de barreras geosintéticas impermeabilizantes. Además, se ha estudiado la degradación superficial de las geomembranas de PVC-P mediante microscopia óptica y electrónica, así como la composición de los plastificantes empleando las técnicas de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier y cromatografía de gases combinada con espectrometría de masas. La misma metodología se ha realizado en el estudio de las geomembranas de PEAD y EPDM con excepción de la determinación de la composición de las mismas.

La toma de muestras en las geomembranas de los embalses se realizó anualmente extrayendo la mínima cantidad de material con la finalidad de obtener resultados representativos y dañar lo menos posible la barrera geosintética.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El estudio comparativo de las dos geomembranas de PVC ha puesto de manifiesto el diferente comportamiento de la lámina instalada en el embalse cubierto de El Saltadero respecto a la situada a la intemperie, en el campo experimental.

Las tendencias observadas en la evolución de las características de la geomembrana instalada en la balsa cubierta de El Saltadero han mostrado una disminución del espesor de la geomembrana, la rotura del material sometido a la prueba de doblado a -20°C a los 14 años de su puesta en obra, el aumento de la resistencia a la tracción y a la perforación de la lámina a lo largo del tiempo, así como una elevada pérdida de plastificantes, 63.2% a los 17 años de su puesta en obra.

La evolución de las características en la geomembrana del campo experimental ha mostrado una tendencia a la disminución menos acusada que la experimentada por la lámina de la balsa cubierta. La pérdida de plastificantes en la lámina del campo experimental ha sido del 37.5% a los 17 años de su instalación.

La información aportada por la microscopia óptica y electrónica ha permitido detectar una mayor degradación superficial en la geomembrana del campo experimental con la presencia de grietas y fisuras de elevada profundidad, debido a su exposición a la radiación ultravioleta, mientras que la lámina de la balsa cubierta de El Saltadero presenta una superficie homogénea, con grietas y fisuras de pequeña profundidad.

De todo lo observado, se ha podido comprobar que el contenido en plastificantes, en particular su disminución, representa un índice significativo de la degradación del PVC, ya que pone de manifiesto la pérdida de propiedades que fueron alcanzadas gracias a su adición en la formulación de las geomembranas.

Finalmente se puede concluir que, contrariamente a lo que cabría esperar, el mejor comportamiento de la geomembrana de PVC-P corresponde a la situada a la intemperie en el campo experimental y no a la instalada en el embalse cubierto de El Saltadero. Este hecho se debe a que la geomembrana del campo experimental ha sufrido la degradación superficial debida a la radiación ultravioleta mientras que en la instalada en el embalse cubierto la degradación debida a una pérdida de plastificantes elevada.

El resultado del análisis comparativo de las geomembranas de PEAD y EPDM ha mostrado que las láminas que experimentan mayor degradación han sido las instaladas en los embalses sin cubrir de Cuatro Caminos y Los Dos Pinos.

SUMMARY

INTRODUCTION

The use of synthetic geomembranes in hydraulic works emerged in Spain in the 1970s in the area of Ibi, in Alicante where the elastomeric barriers of butyl rubber (IIR) began to be installed. Afterwards, new materials such as plasticized polyvinyl chloride (PVC-P), high-density polyethylene (HDPE) and ethylene-propylene-diene-terpolymer rubber (EPDM) emerged as the most used materials worldwide, in the waterproofing of reservoirs.

One of the facts to develop PVC-P geomembranes in our country was the Hydrologic Plan of Canary Islands in the 80's. At that time, the responsible establishment from this Community, Balsas de Tenerife (BALTEN), and Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) started a long collaboration to study the behavior of PVC-P geomembranes installed in first reservoirs built on Tenerife island, being one of them the reservoir of El Saltadero, located in the south of the island.

Afterwards, the construction of an experimental field was planned inside the reservoir of El Saltadero, in order to study new polymeric materials and others, which otherwise, its weathering behavior was unknown in our country. This experimental field is oriented towards the south, location that receives greater radiation coming from the sun in the northern hemisphere and because it is the most favorable situation to accelerate the degradation of the polymeric materials.

The reservoir “El Saltadero” is a covered with a black polyethylene mesh supported by high strength polyamide cords. The installation of this shade cover was considered beneficial to reduce evaporation and algae formation in the long water storage seasons. It was also considered useful to protect the PVC-P geomembrane from solar radiation.

AIM OF THIS WORK

The research work has focused on the study of the effects of shade cover on the PVC-P

geomembrane installed in the covered reservoir of El Saltadero.

In order to know the effects of the shading cover, we have studied the behavior of the same PVC-P geomembrane but installed outdoors, in the experimental field located in the outdoor area of the reservoir El Saltadero.

Likewise, a comparative study was carried out between the HDPE geomembranes installed in the covered reservoir San Lorenzo and uncovered reservoir Cuatro Caminos and the EPDM geomembranes installed in the covered reservoir Ravelo and in uncovered reservoir Los Dos Pinos.

METHODOLOGY

The study of the behavior of the two PVC-P geomembranes was carried out by determining the following physico-chemical characteristics: thickness of the geomembrane, foldability at low temperature, resistance to dynamic impact and content of plasticizers; as well as the mechanical characteristics of tensile strength, elongation at maximum load, puncture resistance and displacement of plunger and seams resistance. This characterization has been carried out as indicated in the european standard of waterproofing geosynthetic barriers. In addition, the surface degradation of PVC-P geomembranes has been studied by optical and electron microscopy, as well as the composition of plasticizers using infrared spectroscopy by Fourier transform and gas chromatography combined with mass spectrometry. The same methodology was used in the study of HDPE and EPDM geomembranes, except for the determination of the composition of the geomembranes.

Sampling in the geomembranes of the reservoirs was performed annually by extracting the minimum amount of material in order to obtain representative results and to damage as little as possible the geosynthetic barrier.

RESULTS AND CONCLUSIONS

The comparative study of the two PVC-P geomembranes has revealed the different behavior of the sheet installed in the covered reservoir El Saltadero in relation to the exposed one in the experimental field.

The trends observed in the evolution of the characteristics of the geomembrane installed in the covered reservoir El Saltadero have shown a decrease in the thickness of the geomembrane, the break of material subjected to the folding test at -20°C at 14 years since its installation, the increase in the tensile strength and puncture resistance over time, as well as a high loss of plasticizers, 63.2% after 17 years.

The evolution of the characteristics in the geomembrane of the experimental field has shown a tendency to decrease less marked than that experienced by the geomembrane of the covered reservoir. The loss of plasticizers in the sheet of the experimental field was 37.5% at 17 years of its installation.

The information provided by optical and electronic microscopy has allowed to detect a greater surface degradation in the geomembrane of the experimental field with the presence of cracks and fissures of high depth, due to its exposure to the ultraviolet radiation, whereas the sheet of the covered reservoir El Saltadero presents a homogeneous surface, with cracks and fissures of small depth.

From all that has been observed, it has been verified that the content of plasticizers, in particular their decrease, represents a significant index of the degradation of the PVC, since it shows the loss of properties that were reached thanks to its addition in the formulation of the geomembranes.

Finally, it is possible to conclude that, contrary to what one would expect, the best behavior of the PVC-P geomembrane corresponds to the one located in the outdoor area in the experimental field and not to the one installed in the covered reservoir of El Saltadero. This is because the geomembrane of the experimental field has undergone surface degradation due to ultraviolet radiation while in the installed in the covered reservoir the degradation is due to a high loss of plasticizers.

The results of the comparative analysis of the HDPE and EPDM geomembranes have shown that the sheets that experience the greatest degradation have been installed in the uncovered reservoirs of Cuatro Caminos and Los Dos Pinos.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. MATERIALES GEOSINTÉTICOS EN INGENIERÍA CIVIL

El uso de los materiales geosintéticos en ingeniería civil se remonta a los años 1940, teniendo una mayor expansión entre los años 1960 y 1970 como sistemas impermeabilizantes de canales, presas y embalses (Duquennoi, 2002). En la bibliografía hay numerosas referencias en las que se menciona el uso de recubrimientos de caucho en los años 1930 y de poli(cloruro de vinilo) (PVC) en los años 1940 (Koerner, 2005). En esas mismas fechas, en EE.UU., se empiezan a emplear materiales bituminosos de aplicación *in situ* en el recubrimiento de canales.

Posteriormente comienzan a introducirse nuevos materiales poliméricos como geomembranas impermeabilizantes en embalses y vertederos. Entre estos materiales se encuentran la utilización del polietileno clorosulfonado (CSPE), en 1960, y el polietileno de alta densidad (PEAD), en 1980. El desarrollo alcanzado por el PEAD en EEUU y Alemania fue propiciado por regulaciones gubernamentales para su uso en vertederos (Zanzinger, 2007).

La Comisión Internacional de Grandes Presas en su boletín nº 78 del año 1991 (ICOLD 1991) hace referencia a la primera balsa impermeabilizada con una geomembrana de caucho butilo (IIR) en el año 1969 en Kualapuu (Molokai, Islas Hawai). Este mismo boletín señala que la primera presa impermeabilizada con una geomembrana sintética fue la de Contrada Sabetta en Italia, esta obra tuvo lugar en el año 1959.

El caucho butilo es uno de los primeros materiales poliméricos que se emplearon en la impermeabilización de presas y embalses desde los años 1950. Obras hidráulicas como las presas de la Miel en Francia y Sugarloaf en Australia, se impermeabilizaron con geomembranas caucho butilo.

A nivel internacional existen numerosas referencias a la impermeabilización de embalses con geosintéticos (Tabla 1.1). En esta tabla se puede observar la función de los embalses así como los diferentes materiales poliméricos empleados. Los embalses son utilizados en los sectores de la electricidad, almacenamiento de agua para riego e incluso de agua potable.

**Tabla 1.1. Referencias del empleo de geosintéticos en embalses 1990-1996.
(Duquennoi, 2002)**

Localización	Año	Aplicación	Geosintético	Superficie m ²	Volumen, m ³
Kuriyama (Japón)	1990	Electricidad	PVC 1.5 mm	195 000	2 520 000
Eagle Rock (EE.UU.)	Antes de 1990	Agua potable	Cubierta flotante de CSPE	130 000	315 000
Villa Juarez (México)	1991	Electricidad	PEAD 1.5 mm	22 000	No disponible
Oblatos Gorge (México)	1992	Electricidad	CSPE 0.9 y 1.5 mm	140 000	1 600 000
Barlovento (Islas Canarias, España)	1992	Riego	PVC 1.5 mm	250 000	5 500 000
Visari (Creta, Grecia)	1993	Riego	PEAD 0.75 mm	90 000	600 000
Rogliano (Francia)	1995	Agua potable	Cubierta flotante de PVC reforzado 1.2 mm PVC 1.5 mm	9 600 10 500	45 000
Isla de Okinawa (Japón)	1996	Electricidad	EPDM 2.0 mm	53 000	420 000

1.2. EXPERIENCIA ESPAÑOLA EN LA IMPERMEABILIZACIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS

La utilización de geomembranas sintéticas en el campo de las Obras Hidráulicas surge en España en la década de los setenta en el sudeste peninsular, concretamente en la zona de Ibi, en la provincia de Alicante, donde se comienzan a instalar barreras elastoméricas a base de caucho butilo (IIR) (Blanco 2005).

Anteriormente se había recurrido a la impermeabilización con sistemas líquidos, como el caso de la balsa de El Saltadero o al empleo láminas de pequeño espesor de polietileno de baja densidad (PEBD), protegidas con un recubrimiento arena y grava, como la balsa de El Fraile en el sur de la isla de Tenerife e incluso se habían utilizado geomembranas bituminosas modificadas con caucho en algunas presas de los Pirineos, como la de Aiguamoix en Lérida (Blanco 2012).

En el año 1968 se construyó la presa del Odiel Perejil en Campofrío, en el municipio de Aracena en la provincia de Huelva, instalando una geomembrana termoplástica de polietileno clorado (CPE) en el interior del paramento. En el año 2002 se realizaron una serie catas para evaluar la geomembrana al cabo de los años, comprobándose que se encontraba en perfecto estado de conservación (Blanco y Zaragoza 2003).

A principios de los años 1970 se impermeabilizó el azud de Matavacas (Sanlúcar de Guadiana, Huelva) con una geomembrana sintética de caucho butilo que aún presenta buenas características excepto en las uniones entre paños (Cea et al. 2003, Blanco et al 2010).

A pesar de ser el primer material impermeabilizante empleado como geomembrana, el caucho butilo fue siendo desplazado por otros materiales poliméricos debido a su baja resistencia al ozono. La macromolécula del caucho butilo presenta en su estructura dobles enlaces de tipo “o” y “π” que hace que sea susceptible de ser atacada por reactivos electrófilos como el ozono, que aún en pequeñas proporciones, junto con las tensiones a las que se encuentra sometida la geomembrana, es capaz de romper el mencionado enlace “π” causando el deterioro de la geomembrana (Navarro et al. 1989).

Cronológicamente surgió el poli(cloruro de vinilo) como sucesor del caucho butilo, que se fue introduciendo, en primer lugar, reforzado con tejido de hilos sintéticos y más tarde, como material homogéneo e incluso con inserción de fibra de vidrio. Las geomembranas de PVC no eran atacadas por el ozono atmosférico, causa principal de la degradación del butilo, debido a que en la macromolécula del polímero solo hay enlaces “o” que no son vulnerables a reactivos electrófilos como era el ozono.

Un hecho que favoreció el empleo de la barrera geosintética vinílica en nuestro país fue el desarrollo del Plan Hidráulico de la Comunidad Autónoma de Canarias en la década de los años 80 del siglo pasado. Este Plan contempló la construcción de diez embalses de

almacenamiento de agua para riego, de los cuales, nueve se impermeabilizaron con geomembranas de poli(cloruro de vinilo). El organismo autónomo local, encargado de gestionar el mantenimiento de estas estructuras hidráulicas denominado Balsas de Tenerife (BALTEN) inicia la colaboración con el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) con objeto de realizar el estudio de las geomembranas de PVC a lo largo del tiempo. El seguimiento llevado a cabo en aquellas láminas vinílicas influyó notablemente en su expansión, tanto en la Comunidad Autónoma de Canarias como en la Península (Aguiar y Blanco 1995).

No obstante, a pesar del buen comportamiento que presentaban las geomembranas de PVC, en algunos casos la pérdida de plastificantes degradaba el material de una forma bastante rápida, hecho que dio lugar a la introducción de las geomembranas de polietileno de alta densidad (PEAD). Las primeras impermeabilizaciones con PEAD se realizaron en embalses situados la Comunidad Autónoma de Castilla-León (Villalar de los Comuneros, Barco de Ávila, Payuelos) y en Canarias (San Isidro, Valle de San Lorenzo, Cuatro Caminos) (Blanco y Aguiar 1998).

Con objeto de mejorar las deficiencias que presentaba el caucho butilo frente al ozono, surgió el caucho terpolímero de etileno-propileno-monómero diénico (EPDM). Este caucho posee una cantidad mínima de dobles enlaces, que provienen del dieno que forma parte de su macromolécula, lo que hace que no sea atacado por el ozono atmosférico dando mejores resultados en la impermeabilización de embalses (Blanco et al. 2011, 2015, Noval et al. 2014).

La colaboración de BALTEN con el CEDEX, durante más de veinte años, ha hecho posible poder estudiar y llegar a conocer el comportamiento de una serie de materiales poliméricos de diferente naturaleza y por tanto a descifrar sus fenómenos de degradación.

Las primeras balsas de la isla de Tenerife se impermeabilizaron con geomembranas de PVC, tanto reforzadas con tejido de hilos sintéticos como sin refuerzo. Posteriormente, se comenzaron a utilizar otros materiales poliméricos como el polietileno de alta densidad (PEAD) y el caucho termoplástico etileno-propileno-monómero dieno (EPDM).

La necesidad de evaluar el comportamiento de nuevos materiales poliméricos para su empleo como geomembranas, hizo que se instalara un campo experimental en un talud artificial construido dentro del recinto de la balsa de El Saltadero. En dicho talud se

instalaron diferentes materiales, en algunos casos productos de nueva implantación y cuyo comportamiento a la intemperie era desconocido. Así, se instalaron muestras de materiales de poli(cloruro de vinilo) plastificado con diferentes refuerzos, polietileno de alta y media densidad (PEAD y PEMD), polipropileno (PP), copolímeros de etileno-acetato de vinilo (EVA/C), polietileno clorosulfonado (CSM), etileno-propileno-monómero diénico (EPDM) y poliolefinas elastoméricas (POE).

Este trabajo se ha centrado en el estudio del comportamiento de una geomembrana de poli(cloruro de vinilo) plastificado con un tejido de hilos sintéticos, como material de refuerzo, instalada en el interior de la balsa de El Saltadero y una muestra de la misma geomembrana instalada en el campo experimental.

1.3. MARCO CLIMÁTICO EN LA ISLA DE TENERIFE

El Cabildo Insular de Tenerife promovió en los años ochenta del siglo pasado dos iniciativas de carácter hidráulico: el **“Plan de Balsas del Norte de Tenerife (1980-1990)”** y el **“Programa de Reutilización de las aguas depuradas de las ciudades de Santa Cruz y La Laguna (1984-1994)”**.

El Plan de Balsas del Norte de Tenerife contempló, desde 1983, la construcción de diez embalses con una capacidad total de 3,25 hm³, que tenían como objetivo el almacenamiento y regulación del agua excedente del invierno procedente de las explotaciones agrarias, que a su vez recogían el agua procedente de galerías. Esto permitió que los agricultores dispusieran de un importante caudal de agua en los períodos de mayor demanda, como es la época estival (BALTEN 20 AÑOS).

El Programa de Reutilización de las aguas depuradas de las ciudades de Santa Cruz y La Laguna estableció la construcción de las infraestructuras necesarias para la reutilización de aguas procedentes de Santa Cruz en el Valle de San Lorenzo y las de La Laguna en el Valle Guerra. Esto dio lugar a la construcción de dos embalses y 70 km de tuberías de impulsión y transporte en el sur de la isla. En el norte se construyó una balsa y 12 km de tubería de transporte.

Todo esto pone de manifiesto la importancia que tiene el agua en las islas Canarias, en general, y en la isla de Tenerife en particular. La escasez de recursos hídricos es una

característica común en la mayoría de las islas del Archipiélago Canario. En la isla de Tenerife los recursos que fluyen en la superficie o que manan al exterior de forma natural a lo largo de un año se estiman en 16 hm³ como valor medio. Esto significa que la disponibilidad de agua en la isla es de unos 20 m³/habitante/año, cifra muy lejana de los 2470 m³/habitante/año que se dispone en la Península (Braojos et al. 2006).

El archipiélago Canario está situado al noroeste del Continente Africano y aunque le correspondería por su latitud un clima seco y cálido, la presencia de los vientos alisios, proporciona a las vertientes septentrionales de las islas de más altura, como es el caso de Tenerife, un clima húmedo y templado (Figura 1.1).

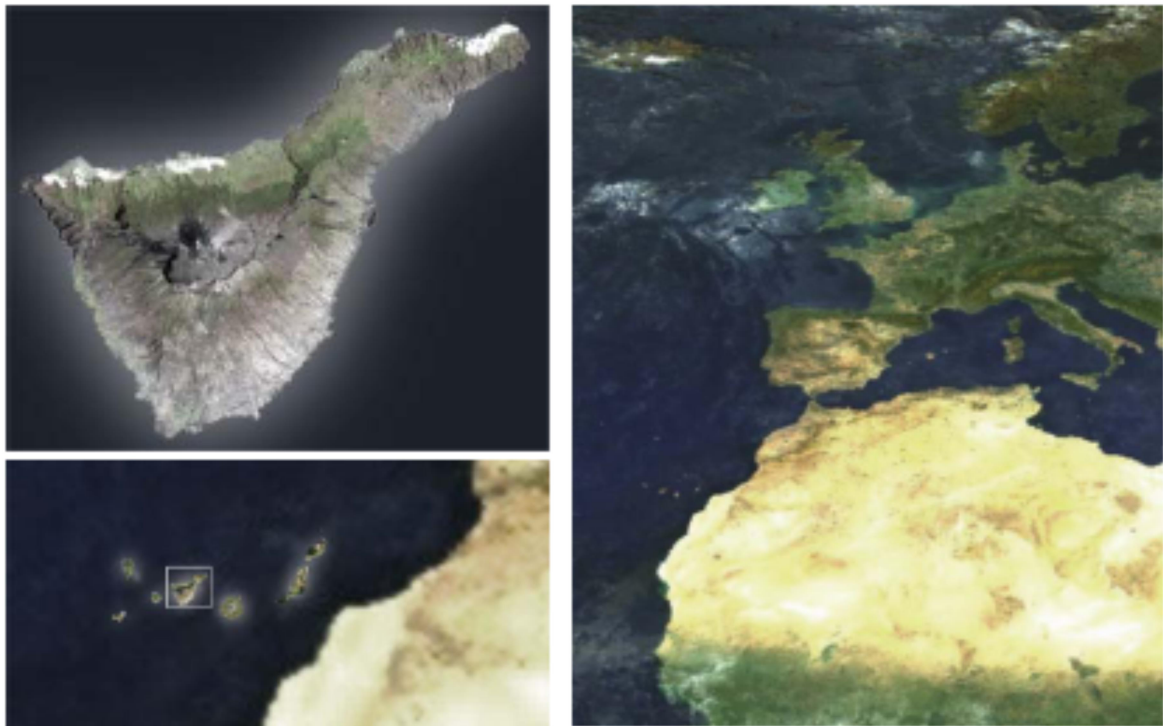


Figura 1.1. Tenerife en su entorno geográfico (Braojos et al. 2006).

El Consejo Insular de Aguas de Tenerife realizó un estudio exhaustivo de recopilación y revisión de datos meteorológicos logrando componer series de registros de lluvias y temperatura para el conjunto de la isla de hasta 60 años de extensión (1944-2003). Los datos obtenidos respecto a la precipitación y temperatura media insular mostraron que se ha producido un descenso de 3 mm/año en la precipitación y una tendencia ascendente de 0.01°C/año en la temperatura. Además, el estudio realizado en los últimos 20 años ha confirmado que la temperatura ha aumentado un valor de 0.03°C/año.

Estos datos junto con la elevada radiación solar que sufre la isla de Tenerife (Figura 1.2) hace que se deba tener en cuenta la evaporación sufrida por el agua almacenada en los embalses situados en la zona sur de la isla, como es el caso de la balsa de El Saltadero.

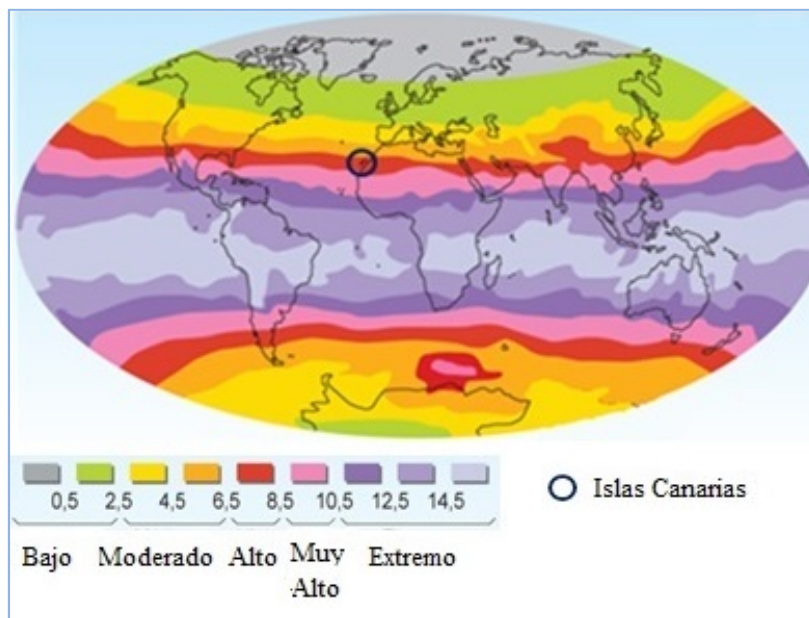


Figura 1.2. Máximo índice UV diario en tiempo despejado (Bournay & UNEP/GRID-Arendal 2007).

1.4. SISTEMAS PARA EVITAR LA EVAPORACIÓN

Las pérdidas de agua por evaporación en balsas de almacenamiento de agua para riego es un problema extremadamente grave en zonas áridas como Estados Unidos, Australia, Israel y España, concretamente en la cuenca del Mediterráneo llegando a ser de notable importancia, tanto desde el punto de vista medioambiental como económico.

Estudios realizados en la década de los 90 en el Campo de Dalías (Almería) cifran las pérdidas por evaporación en un 17% del total de las pérdidas de agua en la actividad agrícola (Bengoechea et al. 1991).

Las pérdidas anuales por evaporación en la cuenca del Segura se estimaron en más del 8% de los recursos hídricos destinados al riego en esta zona de España. (Martínez et al 2008).

En ciertas zonas de Australia la evaporación de agua en embalses agrícolas se estimó en 1000 hm³, lo que suponía un 40% de la capacidad de almacenamiento disponible (Brown 1988, Finn y Barnes 2002). En el año 2006, esas pérdidas en Turquía representaban el 20% del agua disponible (Gökbülak y Özhan 2006).

Estos fenómenos de evaporación han conducido a que la construcción de balsas cubiertas se considere de vital importancia (Blanco et al. 2013, 2016).

Los primeros sistemas para evitar la evaporación del agua de las balsas se remontan a los años 60 del siglo XX. En aquellos momentos comenzaron a emplearse aceites y compuestos poco volátiles, que formaban una capa sobre la superficie del agua que impedía la evaporación. Desde entonces y hasta nuestros días se han llevado a cabo numerosos avances en los sistemas para evitar la evaporación, lo que ha conducido a la existencia de diferentes tecnologías para solucionar este problema. Las diferentes técnicas para evitar la evaporación en las balsas de almacenamiento de agua se pueden diferenciar en cinco grupos (Redón 2011):

Métodos químicos. Sustancias poco volátiles que forman una capa sobre la superficie del agua de la balsa.

Métodos físicos. Sustancias que modifican las propiedades físicas del agua como son la temperatura y el color.

Métodos biológicos. Instalación de especies vegetales, como los nenúfares, para crear una cobertura vegetal.

Métodos de diseño y manejo. Diseño de balsas con menor superficie de agua y mayor profundidad, disponer cortavientos de naturaleza vegetal para disminuir la velocidad y acción del viento sobre la superficie del agua o bien situar tomas superficiales de agua para extraer, en primer lugar, las aguas con mayor temperatura.

Métodos mecánicos o estructurales. Construcción de estructuras fijas o flotantes que minimizan el efecto de la radiación solar sobre la geomembrana.

De todos estos métodos empleados para la reducción de la evaporación de agua el de mayor interés en el caso de la balsa de El Saltadero es el que emplea una estructura fija anclada al perímetro de la balsa que, debido al material empleado, se han denominado *Coberturas*

de sombreo suspendidas. Estas están constituidas por una malla de sombreo, hilos de sustentación y un anclaje en todo el perímetro de la balsa.

El diseño de las **mallas de sombreo** ha evolucionado, desde una capa simple de rafia de polietileno, hasta los últimos diseños de mallas tejidas de doble capa de polietileno estabilizado con negro de carbono. Estas últimas presentan una elevada resistencia a la radiación ultravioleta y unas mejores características mecánicas: una elevada resistencia a la tracción y unos alargamientos muy reducidos. Dependiendo de la configuración en el diseño de la malla de sombreo, se consiguen unos valores de permeabilidad al agua de lluvia de 10 litros/m²/min junto con elevados porcentajes de sombreo, aproximadamente 98%.

Respecto a los **cordones de sustentación**, los más utilizados en la actualidad son, de poliamida o poliéster de elevada tenacidad. Estos presentan una serie de ventajas frente a los alambres de acero, como son una mayor durabilidad ya que no se oxidan, mayor flexibilidad que evita la aparición de tensiones en el entramado de los hilos, mejor compatibilidad con la malla de sombreo, en el sentido que se evitan roces que podrían dar lugar a roturas de la misma, mejor compatibilidad en los anclajes debido a la mejor adaptación de los hilos sintéticos a la geometría del perímetro de la balsa, y, por último estos hilos sintéticos son muy buenos aislantes por lo que no absorben ni conducen calor fácilmente.

La tercera parte del sistema de sombreo se refiere al **anclaje perimetral**, que se resuelve mediante un tubo al que se atan los hilos de sustentación. Un buen acabado en el cierre perimetral viene dado porque la malla de sombreo quede a la misma cota que la coronación de la balsa. El cierre perimetral es un factor importante para conseguir un buen funcionamiento del sistema de cobertura, de forma que se evite que el viento lateral produzca efectos dañinos en el interior de la balsa (Donoso 2005).

Las coberturas de sombreo suspendidas tienen una acción directa sobre todos los factores que afectan a la evaporación: reducen la incidencia de la radiación ultravioleta y el viento en la geomembrana. Asimismo, retienen el aire húmedo existente entre la malla de sombreo y la superficie del agua (Redón 2011).

La primera balsa de la isla de Tenerife para la que se diseñó una cubierta con malla de sombreo fue la balsa de El Saltadero, hecho que sirvió como base para la elaboración de la

norma UNE 104426 “Impermeabilización. Puesta en obra. Construcción de balsas cubiertas impermeabilizadas con geomembranas sintéticas” (AENOR 2008). Esta norma fue elaborada por el comité técnico AEN/CTN 104 Materiales para la construcción y publicada por AENOR en el año 2008. En ella se describe el sistema estructural de la cubierta exponiendo los dos métodos más usuales para llevar a cabo la cubrición de la balsa (Figura 1.3).

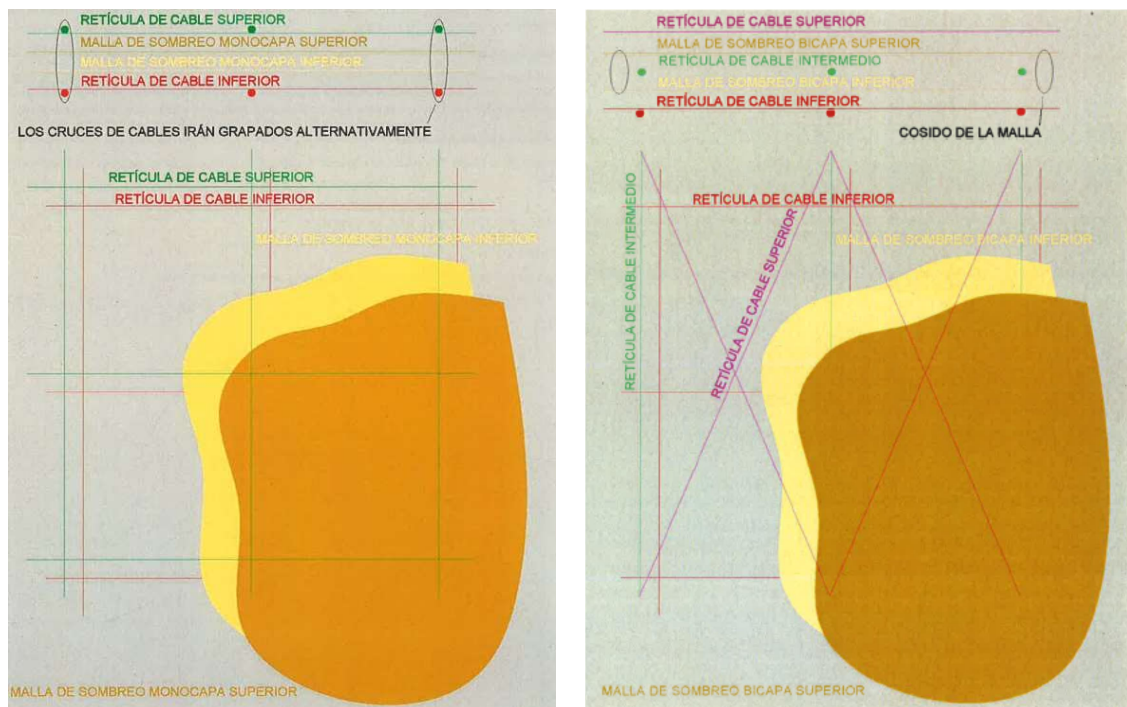


Figura 1.3. Esquema de los dos métodos más usuales para la cubierta de balsas de almacenamiento de agua (AENOR 2008).

Las Figuras 1.4 y 1.5 muestran la disposición de la cobertura de sombreado en la balsa de El Saltadero. Se puede observar como la malla de sombreado y la retícula de cables que soportan la cobertura están anclados a la viga perimetral en la vía de coronación.

La cobertura de sombreado está formada por una malla ortogonal de cordones de poliamida en dos capas, entre las que se intercalan dos láminas de sombreado de polietileno de alta densidad, que reducen en un 85% el paso de luz (Renz 2005).

La superficie cubierta de la balsa de El Saltadero es de 38.000 m². Su instalación finalizó en el año 2000 y desde entonces está cumpliendo su función correctamente.



Figura 1.4. Cubierta de la balsa de El Saltadero.



Figura 1.5. Vista panorámica del interior de la balsa de El Saltadero.

La experiencia adquirida en la balsa de El Saltadero hizo que se planteara la realización de las obras para cubrir las balsas de Valle de San Lorenzo, situada en el municipio de Arona (sur de Tenerife). Asimismo, se procedió a cubrir la balsa de Ravelo, situada en el municipio de Buenavista del Norte. En las Figuras 1.6 y 1.7 se puede ver la cobertura de sombreado.



Figura 1.6. Vista panorámica de la balsa de Valle de San Lorenzo.



Figura 1.7. Vista panorámica de la balsa de Ravelo.

1.5. SEGUIMIENTO DE LAS GEOMEMBRANAS EN OBRA

Las características exigibles a las geomembranas que constituyen los sistemas de impermeabilización dependen de su propia naturaleza y de los requerimientos de la obra en la que vayan a instalarse. Estas características han de estar avaladas por una normativa que indique si la geomembrana cumple los requisitos mínimos iniciales, que la hacen apta como barrera impermeabilizante (Blanco et al. 2003, 2008).

En primer lugar, es imprescindible comprobar el estado de lámina impermeabilizante y asegurar que cumple los requerimientos de la normativa vigente. Seguidamente, y después de su instalación, se debe realizar un seguimiento y control periódico del material para evaluar el estado del mismo y así determinar el momento adecuado para realizar la reparación puntual de la geomembrana o bien proponer la reimpermeabilización de la misma.

La normativa española vigente en sistemas de impermeabilización de embalses para riego, en su aspecto de puesta en obra, recomienda la necesidad de llevar a cabo un control periódico de la geomembrana con objeto de determinar su degradación y tomar las medidas necesarias para mantener su función de estanqueidad. Por otra parte, el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses insiste en el aspecto de control y seguimiento de este tipo de obras, con objeto de comprobar el cumplimiento de las condiciones de seguridad, proponiendo las modificaciones necesarias para incrementar la seguridad del embalse.

La selección de las pruebas a efectuar en el control periódico de las geomembranas se debe realizar en base a consumir la menor cantidad posible de material de la balsa y al mismo tiempo obtener datos representativos del estado de la lámina. En este sentido es aconsejable que la muestra extraída se realice en una zona con unión entre paños, y que posea superficie suficiente para poder determinar el ensayo de soldadura.

1.5.1. TOMA DE MUESTRAS

El proceso de extracción de muestras es laborioso y debe hacerse por personal especializado. Las fases que conlleva la toma de muestras están representadas en las Figuras 1.8, 1.9 y

1.10 y corresponden al seguimiento de la geomembrana de la balsa de El Saltadero realizado en 2016.



Figura 1.8. Toma de muestras. Balsa de El Saltadero.



Figura 1.9. Extracción de muestras con soldadura de la balsa de El Saltadero.



Figura 1.10. Reposición de la geomembrana después de la extracción de muestras.

El lugar idóneo para la extracción de material es, por regla general, la zona de coronación del talud norte de la balsa ya que es el área que sufre mayor radiación solar (Aguiar et al. 2003; Blanco 2007, 2008; Crespo, 2011). También conviene hacer una extracción de la zona sur para evaluar el estado del material y poder establecer una comparación entre las distintas zonas de la geomembrana en el embalse. En ocasiones es recomendable seleccionar muestras de la zona intermedia e incluso del área que está siempre cubierta por el agua ya que, aunque no suele ser frecuente, algunos materiales sufren una degradación mayor por el agua que por la radiación solar.

En cualquier caso, siempre que se observe algún tipo de patología en la geomembrana, se deberá seleccionar esa zona para realizar la toma del material correspondiente.

La periodicidad de la toma de muestras se establece en función del estado de la geomembrana y de su tiempo de puesta en obra. Los primeros seguimientos realizados en

los embalses de la isla de Tenerife se hicieron de forma semestral. Posteriormente, la toma de muestras se estableció de forma anual, siendo este período de tiempo el recomendado en las normas de puesta en obra de láminas de PVC UNE 104 423 (AENOR 1995) y UNE 104 427 (AENOR 2010).

La extracción de muestras de ensayo y su posterior reposición deben evitarse, al menos, en los primeros años de la puesta en obra de la geomembrana. Con objeto de facilitar el control en dicho periodo inicial se recomienda la colocación del mismo material que la geomembrana, en diferentes zonas del embalse (probetarios). Las dimensiones de dichos probetarios se muestran en la Figura 1.11, en la que se contempla la soldadura entre paños.

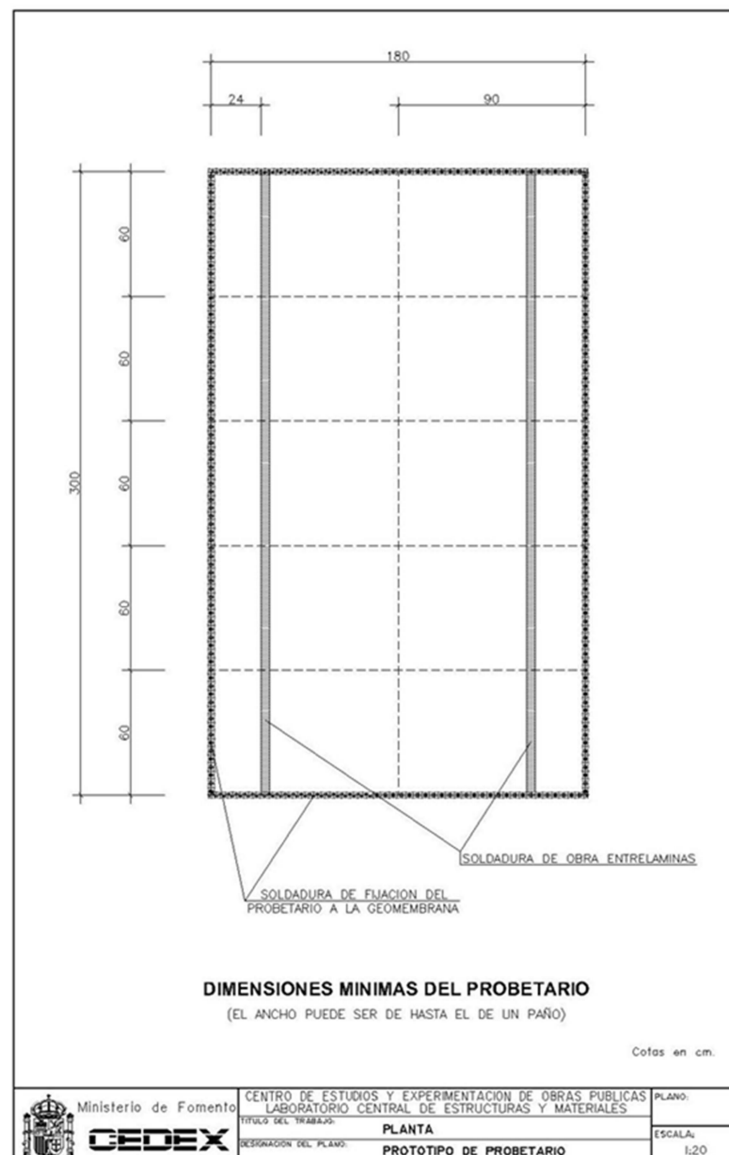


Figura 1.11. Probetario para la extracción de muestras en la balsa.

Las Figuras 1.12, 1.13 y 1.14 muestran una vista panorámica de los probetarios instalados en el talud de la balsa, próxima al fondo, en los que se aprecia la extracción de una muestra con la zona de soldadura.



Figura 1.12. Vista panorámica de los probetarios de la balsa de El Saltadero.



Figura 1.13. Probetario.



Figura 1.14. Probetario visto desde la cubierta de la balsa.

Es recomendable realizar un seguimiento planificado y exhaustivo para asegurar el buen estado de la impermeabilización y así evitar los posibles daños, tanto humanos como al medio ambiente, que pudiera surgir del deterioro de los embalses.

1.6. PATOLOGÍAS DE LAS GEOMEMBRANAS

El seguimiento en obra de los materiales empleados en la impermeabilización de embalses ha permitido detectar una serie de patologías provocadas por diferentes causas. Estas patologías observadas a lo largo del tiempo han sido descritas por Blanco (2012) y se detallan a continuación:

- **Composición de la lámina.** Una correcta formulación de la lámina con la resina adecuada y unos aditivos de calidad suficiente es un factor primordial para asegurar el éxito de la impermeabilización. Sin embargo, la degradación de la resina y la pérdida de los aditivos como plastificantes, antioxidantes, son los factores que pueden considerarse como una de las primeras patologías asociadas al sistema de impermeabilización.
- **Instalación de la geomembrana.** El soporte del sistema impermeabilizante es determinante para conseguir un buen comportamiento de la geomembrana. El propio terreno que conforma el vaso del embalse, hormigón, geotextiles o geomembranas son los diferentes soportes con los que puede estar en contacto la lámina que impermeabiliza la balsa. En el caso de que el soporte sea el propio terreno hay que poner especial cuidado en la eliminación de cantos, guijarros y restos de vegetación que puedan afectar a una buena compactación del terreno. Respecto a los demás soportes mencionados, se debe tener un cuidado especial en la compatibilidad de dichos materiales con la lámina instalada.

La unión entre paños de la lámina es otro factor determinante para el buen comportamiento del sistema de impermeabilización. Tanto si la soldadura se realiza por calor, disolventes o empleando adhesivos, las zonas próximas a las uniones quedan debilitadas, hecho a tener en cuenta en los seguimientos de la impermeabilización.

- **Ubicación.** El entorno tanto geográfico como geológico es un factor primordial a la hora de analizar los supuestos problemas que puede sufrir la geomembrana. Los asentamientos diferenciales del terreno, formación de cavidades, desgastes por erosión interna, eventuales subidas de la capa freática y las condiciones climatológicas de la zona son determinantes en la aparición de posibles patologías.

Es importante destacar la influencia de la temperatura en las retracciones del material, en la pérdida de plastificantes, así como en la soldadura y en otras características mecánicas.

La acción del granizo sobre la geomembrana provoca la aparición de grietas en forma de “pata de gallo” que suelen formarse desde la parte interna a la externa de la lámina.

El viento es otro agente atmosférico que incide directamente en la durabilidad de la geomembrana dando lugar a la separación de anclajes y desgarros influyendo negativamente en la zona de las soldaduras.

Finalmente, es de destacar la acción del agua que almacena el embalse ya que dependiendo de su calidad tendrá un efecto más o menos negativo sobre la pantalla impermeabilizante.

- **Flora y fauna.** Es importante llevar a cabo la limpieza de la vegetación existente en las proximidades de la balsa. Hay especies vegetales que crecen en terrenos muy áridos dando lugar a la perforación de la capa asfáltica que forma el camino de coronación del embalse llegando a invadir la zona impermeabilizada con el consiguiente riesgo.

La presencia de roedores en el entorno y la de otros animales que utilizan la balsa como zona de abrevadero provocan la destrucción de la pantalla impermeabilizante, habiéndose llegado a detectar el geotextil del soporte al descubierto.

Las aves que suelen abrevar en los embalses, viven durante mucho tiempo sobre la geomembrana, sin embargo no se han detectado ni perforaciones por picotazos ni daños causados por sus excrementos.

En último lugar hay que mencionar el ataque por microorganismos ya que la lámina polimérica es susceptible de ser degradada por estos seres vivos cuya acción se ve favorecida por la presencia de humedad.

- **Otros factores.** Existen tantos factores que provocan el fallo del sistema impermeabilizante que resulta complejo enumerarlos todos. Sin embargo sí se pueden mencionar los detectados en las balsas estudiadas a lo largo del tiempo en la isla de Tenerife.

El desprendimiento de piedras y guijarros del terreno que rodea el embalse causa perforaciones en la lámina, lo que hace necesario la instalación de protecciones que impidan estos sucesos.

Acciones incontrolables como el vandalismo y el uso de la balsa para actividades como la natación o la pesca hacen que la geomembrana sufra una degradación que no debería estar contemplada a lo largo de su vida útil.

1.7. TRABAJOS PREVIOS DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN DEL CEDEX

El grupo de investigación del CEDEX, a través de las sucesivas inspecciones a pie de obra en las balsas de las islas de Tenerife y La Palma, junto con los datos obtenidos en el seguimiento del comportamiento de los materiales impermeabilizantes, ha conseguido dejar constancia del comportamiento de estos materiales a lo largo del tiempo.

Este estudio ha sido considerado de gran importancia en la comunidad científica internacional, ya que constituye un trabajo de seguimiento único en el campo de la impermeabilización y que a lo largo de más de 25 años, ha proporcionado un elevado número de resultados, mediante los cuales, se ha conseguido conocer y determinar los factores que influyen en la degradación de las geomembranas.

El estudio de la misma geomembrana de PVC instalada en la balsa cubierta de El Saltadero y en el campo experimental (expuesta a la intemperie) situado en el recinto de la balsa, ofreció unos resultados contradictorios a los que cabía esperar.

El análisis del contenido en plastificantes junto con la evolución de las características físicas y mecánicas puso de manifiesto que el efecto de la cobertura de sombreo, instalada en la balsa de El Saltadero, no era el esperado en cuanto a la degradación de la geomembrana. Debido a esto se procedió a realizar un seguimiento más exhaustivo en otras balsas cubiertas de las islas de Tenerife y La Palma.

El efecto de la cubierta en las geomembranas de las balsas de Valle de San Lorenzo (PEAD), Ravelo (EPDM) y El Saltadero (PVC), ha sido estudiado a través de las características físicas y mecánicas de las geomembranas así como mediante microscopía óptica y electrónica. La evolución de estas características en función del tiempo ha

permitido conocer el diferente comportamiento de estas tres geomembranas mencionadas, utilizadas en la impermeabilización de los tres embalses cubiertos comentados.

1.8. OBJETO Y ALCANCE DEL TRABAJO

El trabajo de investigación presentado en esta memoria se ha centrado en el estudio de los efectos que tiene la cobertura de sombreado en la geomembrana de PVC-P utilizada en la impermeabilización de la balsa de El Saltadero.

El comportamiento de la misma geomembrana de la balsa cubierta de El Saltadero se ha comparado con la expuesta a la intemperie, en el campo experimental, situado dentro del recinto de la balsa.

Con la finalidad de evaluar el comportamiento de las dos geomembranas, se ha realizado el estudio de las características físicas y mecánicas atendiendo a lo contemplado en la normativa europea de barreras geosintéticas impermeabilizantes. Asimismo, se ha estudiado la degradación superficial de las geomembranas mediante microscopía óptica y electrónica y la composición de las mismas a través de diferentes técnicas instrumentales con el objeto de identificar y cuantificar los plastificantes presentes en la geomembrana de PVC.

Partiendo de los resultados previos del grupo de trabajo del CEDEX, en los que se observó un comportamiento contrario al esperado en la evolución del contenido en plastificantes de las dos geomembranas a lo largo de los primeros seguimientos, se ha procedido a estudiar de forma más exhaustiva el comportamiento de las dos geomembranas de PVC-P. En base a esto, se ha procedido a estudiar el comportamiento de las geomembranas de PEAD y EPDM instaladas en los embalses cubiertos de Valle de San Lorenzo y Ravelo, respectivamente, situados en la isla de Tenerife para comparar su comportamiento con el de las geomembranas de PEAD y EPDM instaladas en los embalses, sin cubrir, de Cuatro Caminos y Los Dos Pinos, respectivamente, situados en la isla de La Palma.

Las fases seguidas para la elaboración de este trabajo han sido las siguientes:

- Recopilación bibliográfica para conocer el estado del arte sobre la impermeabilización de embalses con geomembranas de PEAD, EPDM y PVC.
- Recopilación y análisis de los datos correspondientes a las características físicas y mecánicas, registrados durante todo el seguimiento realizado por el CEDEX en las dos geomembranas de PVC-P durante los 16 años de puesta en obra.
- Estudio de la evolución de las características físicas, mecánicas y microscópicas de la geomembrana PVC-P de la balsa cubierta de El Saltadero.
- Identificación y cuantificación de los plastificantes presentes en las geomembranas de PVC-P mediante las técnicas instrumentales de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier, cromatografía de gases combinada con espectrometría de masas.
- Estudio de la evolución de las características físicas, mecánicas y microscópicas de la geomembrana de PVC-P expuesta a la intemperie en el campo experimental.
- Estudio comparativo de los resultados alcanzados por las dos geomembranas de PVC-P, ubicadas en sitios diferentes.
- Recopilación y estudio comparativo de los resultados obtenidos en las geomembranas de PEAD y EPDM instaladas en los embalses cubiertos de San Lorenzo y Ravelo y en los embalses sin cubrir de Cuatro Caminos y Los Dos Pinos.
- Análisis y evaluación de todas las características determinadas con objeto de establecer los efectos que tiene la cobertura de sombreado en la geomembrana de PVC-P de la balsa cubierta de El Saltadero.

1.9. BIBLIOGRAFIA

20 años BALTEN (2010). Ed. OAL BALTEN. Santa Cruz de Tenerife.

AENOR (2008) UNE 104426, *Impermeabilización. Puesta en obra. Construcción de balsas cubiertas impermeabilizadas con geomembranas sintéticas.*

AENOR (1995) UNE 104423, *Materiales sintéticos. Puesta en obra. Sistemas de impermeabilización de embalses para riego o reserva de agua con geomembranas impermeabilizantes formadas por láminas de poli(cloruro de vinilo) plastificado (PVC-P) no resistentes al betún.*

AENOR (2010) UNE 104 427, *Materiales sintéticos. Puesta en obra. Sistemas de impermeabilización de embalses para riego o reservas de agua con geomembranas impermeabilizantes formadas por láminas de polietileno (PE).*

Aguiar, E. y Blanco, M. (1995). *Experience in connection with the performance of plasticized polyvinyl chloride sheeting in Tenerife basin sealing.* Proc. Research and Develop. Field Dams, 361-375. Crans-Montana (Suiza).

Aguiar, E., Blanco, M., Soriano, J. y Vara, T. (2003). *Influencia de la orientación en la degradación del poli (cloruro de vinilo) plastificado utilizado como geomembrana sintética en la impermeabilización del embalse de La Tabona.* Ingeniería Civil, **130**, 95-103.

Bengoechea, J. M., Pérez-Cobos, J., Pérez-Parra, J. y López Segura, J. G. (1991). *Evaluación de las pérdidas de agua de riego en el Campo de Dalías.* Almería. III Symposium sobre el agua en Andalucía.

Blanco, M. (2005). *Geomembranas.* I Simposio Nacional sobre Proyecto, Construcción e Impermeabilización de Balsas. Sevilla.

Blanco, M. (2012). *Spanish experience in the use of synthetic geomembranes for hydraulic works.* Keynote lecture. Blanco et al. (eds.) Proc. EuroGeo5 - 5th European Geosynthetics Congress, Ed. R. B. Servicios Editoriales, S. L.: Electronic proceedings of keynote lectures: pp. 7-23; Printed. Vol. 1 pp. XXIII-XXXIX, R.B. Servicios Editoriales, S.L., Valencia, septiembre.

Blanco, M. y Aguiar, E. (1998). *Geomembranas sintéticas a base de polietileno de alta densidad utilizadas en la impermeabilización de embalses. Seguimiento de obras en las islas Canarias*. Ingeniería Civil, **109**, 49-59.

Blanco, M., Aguiar, E., García, F., Vara, T., Soriano, J. y Castillo, F. (2011). *État de la barrière géosynthétique polymérique en EPDM de la retenue d'El Golfo dans l'île d'El Hierro (Îles Canaries)*. Proc. 8èmes Rencontres Géosynthétiques, 283-293. Tours (Francia).

Blanco, M., Castillo, F., García, F. y Soriano, J. (2010). *Las geomembranas sintéticas en la rehabilitación y mantenimiento de paramentos de presas*. Dam Maintenance and Rehabilitation II. Romeo et al. (eds.) Taylor & Francis Group, 335-341. London.

Blanco, M., García, F., Cea, J.C., Sánchez, F.J. (2008). *Control en obra de la impermeabilización de balsas con geomembranas sintéticas*. Proc. 2º Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación y Obra Pública y 2º Congreso Internacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas. 319-328. Palma de Mallorca

Blanco, M., Leiro, A., Soriano, J., Aguiar, E., Armendáriz, V. y Vara, T. (2003). *Influencia de la orientación en el deterioro de la geomembrana sintética utilizada como pantalla de impermeabilización en el embalse de la Cruz Santa*. Proc. VII Congreso de Patología de la Construcción, Mérida (México)

Blanco, M., Mateo, B., Solera, R., Leiro, A., Castillo, F., Abad, P., Aguiar, E., Vara, T. y Giroud, J.P. (2016). *Performance of PVC-P, HDPE and EPDM installed in common (uncovered) and covered reservoirs*. Proc. EuroGeo6 - 6th European Geosynthetic Congress. Ljubljana, septiembre

Blanco, M., Noval, A. M., Solera, R., Castillo, F. Aguiar, E., Vara, T., Pargada, L., Rico, G. y Giroud, J.P. (2013) *Comportamiento de la misma geomembrana de PVC-P instalada a la intemperie y en un embalse cubierto*. Proceedings. Congreso Geosintec Iberia 1, 114-119.

Blanco, M., Rico, G., Pargada, L., Castillo, F. y Aguiar, E. 2008. *Estudio de plastificantes utilizados en geomembranas de PVC-P empleadas en impermeabilización de obras hidráulicas*. Rev. Plast. Modernos. 96 (629), 386-391.

Blanco, M. y Zaragoza, G. (2003). *El Odiel-Perejil como un caso pionero en la utilización de una geomembrana sintética en la impermeabilización de presas*. Ingeniería Civil, 132, 33-40.

Blanco, M. Zaragoza, G., Aguiar, E. (2003). *El seguimiento de geomembranas sintéticas como factor que contribuye a la seguridad y durabilidad de la impermeabilización de embalses*. Ingeniería civil **129**, 53-71.

Bournay, E y UNEP/GRID Arendal. (2007). *The global solar UV Index*. Vital Ozone Graphics, 28.

Braojos, J.J., Farrujia, I., y Fernández, J.D. (2006). *Los recursos hídricos en Tenerife frente al cambio climático*. Consejo Insular de Aguas de Tenerife.

Brown, J., A. H. (1988). *The potential for reducing open water evaporation losses*. Hydrology and Water Resources Symposium: 108-115.

Cea, J.C., Asanza, E. y Blanco, M. (2003). *Face protection: Geomembranes Lining vs. Paint Coating*. Proc. 21 Congreso Internacional de Grandes presas. Montreal.

Donoso, J.L. (2005). *Sistema de cubrición fija mediante malla de sombreado para evitar pérdidas por evaporación en balsas de agua*. I Simposio Nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas. Vol 1.- Sevilla, octubre-noviembre.

Duquennoi, C. (2002). *Containment ponds, reservoirs and canals*. Geosynthetics and their applications, SK Shukla ed., Thomas Thelford Publishing, London, UK, 299-325.

Finn, N. y Barnes, S. (2002). *Evaporation Trials for Gale Pacific*. CSIRO Textile and Fibre Technology: 26.

Gökbülak, F. y Özhan, S. (2006) *Water loss through evaporation from water surfaces of lakes and reservoirs in Turkey*. E-Water. Official publication of the European Water Association (EWA).

Koerner, R. M. (2005). *Designing with geosynthetics*, Pearson Prentice Hall. 5th Edition.

Martínez, V., González, M., Baille, A. Maestre, J.F. (2008). *Regional assessment of evaporation from agricultural irrigation reservoirs in a semiarid climate*. Agricultural water management **95**, 1056-1066.

Navarro, A., Blanco, M. y Rico, G. (1989). *Materiales Ópticos Orgánicos*. Ed. AAEEO, Madrid.

Redón, M (2011) *Diseño de un sistema de cubierta flotante fotovoltaica para balsas de riego*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Renz, O. (2005). *Balsas cubiertas*. Proc. I Simposio nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas. Sevilla, diciembre.

Zanzinger, H. (2007). *The use of geosynthetics as barrier materials in civil engineering*. In: Sarsby, R. W. (ed.) *Geosynthetics in civil engineering*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited.

CAPÍTULO 2. MATERIALES POLIMÉRICOS

CAPÍTULO 2. MATERIALES POLIMÉRICOS

2.1. MATERIALES POLIMÉRICOS

Los materiales poliméricos presentan una serie de ventajas que han permitido su gran expansión en el campo de la Obra Civil como geomembranas impermeabilizantes. Cabe destacar entre ellas las que se enumeran a continuación:

- Sustituyen a los materiales convencionales de construcción (tierra, arena..)
- Se pueden instalar con relativa facilidad y se adaptan perfectamente al terreno.
- Se pueden reparar de forma sencilla, pues permiten el empleo de calor y adhesivos en sus reposiciones.
- Se pueden utilizar en condiciones adversas, tales como bajas temperaturas.
- Su coste económico los hace competitivo frente a otros materiales de construcción.

Como ya se ha comentado en la Introducción de esta memoria, los polímeros empleados como geomembranas abarcan una amplia variedad, desde elastómeros como el caucho butilo, caucho de cloropreno y caucho de etileno-propileno monómero diénico (Noval et al 2014a, Blanco et al. 2014) hasta termoplásticos como el polietileno, poli(cloruro de vinilo) y polipropileno (Aguiar et al-2010, Blanco et al. 2016a). Esta gran variedad de materiales poliméricos hace que sean aptos para impermeabilizar balsas de almacenamiento de agua para regadío y depósitos de agua potable (Blanco et al. 2016b), vertederos (Giroud y Touze-Foltz, Touze-Foltz 2009, 2012, Zonberg 2010) e incluso para impermeabilizar balsas de lixiviados en explotaciones mineras (Rubín de Célix 2005).

La gran cantidad de materiales poliméricos utilizados en el campo de la impermeabilización de embalses y sus diferentes propiedades han conducido a la elaboración de la norma UNE EN ISO10318 (AENOR 2015) en la que se establece la clasificación de los materiales geosintéticos en función de su comportamiento frente a la permeabilidad al agua. Dicha clasificación define dos grupos bien diferenciados:

➤ ***Permeables***

- *Geotextiles y productos relacionados.*

➤ ***Esencialmente impermeables:***

- *Barreras geosintéticas: Poliméricas, Bentoníticas y Bituminosas*

Los geosintéticos permeables están constituidos por fibras de polietileno, poliésteres y poliamidas. Esta diversidad de polímeros hace posible su aplicación como materiales de separación, filtración, drenaje, refuerzo y protección. Una de las características fundamentales exigidas a estos geosintéticos es su durabilidad, la cual se ve afectada por los materiales que constituyen el terreno con el que estarán en contacto y por el agua. El contacto con el agua puede dar lugar a procesos de hidrólisis con la consiguiente degradación del polímero.

2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES POLIMÉRICOS EMPLEADOS COMO GEOMEMBRANAS

Los materiales poliméricos se pueden agrupar en tres tipos (Tabla 2.1), teniendo en cuenta las propiedades físicas de estos materiales, la normativa europea vigente UNE EN ISO10318 (AENOR 2015) y según Blanco (2012).

Tipo I. Termoplásticos. Son polímeros que funden al aportarles calor y solidifican al enfriarse. Los termoplásticos están formados por cadenas lineales o ramificadas que fluyen unas sobre otras cuando son calentadas y solidifican en una nueva forma cuando son enfriadas sin que se rompa significativamente su cadena. Son materiales reciclables y presentan una fácil procesabilidad en técnicas de fabricación como la extrusión, calandrado y moldeo. Funden sin descomposición.

Tipo II. Cauchos termoplásticos. Son copolímeros de bloque que contienen en la cadena polimérica una secuencia rígida y otra secuencia flexible. Estos materiales poseen carácter termoplástico y también propiedades elastoméricas y pueden estar reticulados de forma química o física. La reticulación química es reversible a altas temperaturas, convirtiéndose en termoplásticos. Los elastómeros reticulados físicamente consisten, por lo general, en una mezcla de una matriz termoplástica y un caucho, de forma que al ser calentados se transforman en polímeros termoplásticos con las características elásticas del caucho.

Tipo III. Termoestables llamados también duroplastos o termoendurecibles. Son aquellos materiales que por acción de catalizadores adecuados endurecen de forma irreversible. Funden con descomposición y están formados por macromoléculas muy ramificadas o reticuladas que se entrecruzan entre sí por puentes de enlace (“crosslinking”). La característica fundamental de los termoestables es que son capaces de soportar grandes

deformaciones recuperando su forma inicial una vez que se elimina el esfuerzo aplicado. Respecto a su fabricación presentan una desventaja frente a los termoplásticos y es que requieren un procesamiento más lento, lo que consume grandes cantidades de energía. Frecuentemente se les conoce con el nombre de elastómeros.

Tabla 2.1. Materiales poliméricos empleados en la impermeabilización con geomembranas

NOMENCLATURA	MATERIAL BÁSICO	CLASE
ECB	Copolímeros de acrilato etileno y betún	I
E/VAC	Copolímeros de acetato de vinilo y etileno	
PE	Polietileno	
PP	Polipropileno	
PE-C	Polietileno clorado	
PIB	Poliisobutileno	
PVC-P	Poli(cloruro de vinilo) plastificado	
TPO	Termoplástico poliolefínico	
E/P	Copolímeros de etileno/propileno	II
CSM	Polietileno clorosulfonado	
CR	Caucho de cloropreno	III
EPDM	Caucho terpolímero de etileno/propileno/diénico	
IIR	Caucho butilo	
NBR	Caucho de acrilonitrilo/butadieno	
BR	Caucho de butadieno	
POE	Poliolefina elastomérica	

Los polímeros en estado puro no satisfacen todas las demandas tecnológicas para las que son requeridos, por este motivo es necesaria la utilización de una serie de aditivos que hacen posible cubrir dichas demandas tecnológicas y poder utilizarlos adecuadamente.

Este es el caso de las geomembranas poliméricas empleadas en la impermeabilización de balsas de riego. La geomembrana impermeabilizante, al estar expuesta a la intemperie, no puede estar compuesta del polímero solamente, de ahí que, para su puesta en servicio, sea necesario formular una composición adecuada y estable que cumpla la función de aislar y mantener sin fugas el gran volumen de agua almacenado en estas estructuras hidráulicas.

La composición de una geomembrana impermeabilizante está constituida por el material polimérico y una serie de aditivos que harán que la mezcla sea estable y pueda ser tratada con facilidad en su proceso de fabricación (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Composición de geomembranas empleadas en impermeabilización.
(Hsuan et al. 2008; Koerner 2005)

Polímero	Resina, %	Plastificante, %	Cargas, %	Negro de carbono, %	Aditivos, %
PEAD	96-98	0	0	2-3	0.5-2
PELBD	96-98	0	0	2-3	0.25-1
PPf	96-98	0	0	2-3	0.25-1
PVC	50-70	25-35	0-10	1-2	0-1
CSPE	40-60	0	40-50	5-10	5-15
EPDM	25-30	0	20-40	20-40	1-5
PEAD: Polietileno de alta densidad; PELBD: polietileno lineal de baja densidad; PPf: polipropileno flexible; PVC: Poli(cloruro de vinilo) plastificado; CSPE: Polietileno clorosulfonado; EPDM: Etileno-propileno-dieno monómero					

Los aditivos no afectan a la constitución ni configuración de las cadenas poliméricas pero sí pueden cambiar las conformaciones y estructura de esas cadenas o bien las características superficiales del polímero. El caso de la tecnología del caucho es uno de los ejemplos mejor conocidos; el caucho mediante variaciones en los aditivos, puede dar lugar a productos tan diferentes como neumáticos, bandas elásticas y gomas de borrar. De igual forma es posible

conseguir variedades de productos muy diversos con otros materiales poliméricos y en especial con el PVC, con el que se pueden preparar desde tuberías rígidas para agua, puertas, ventanas y cintas transportadoras hasta aislantes para cables eléctricos (Brydson 1995; Beltrán y Marcilla 2012).

En general, los aditivos deben cumplir unos requisitos importantes como la estabilidad en las condiciones de procesado y puesta en servicio, no deben experimentar exudación ni sangrado de la matriz polimérica, no deben ser tóxicos ni proporcionar olor ni sabor y por último un requisito importante es que no deben aumentar el coste del producto final.

Los aditivos no se clasifican según su composición química sino que lo hacen según la función que van a ejercer en el polímero (Tabla 2.3). Dentro de la gran variedad de aditivos, se van a mencionar los que presentan mayor relevancia (MARM 2010).

Tabla 2.3. Tipo de aditivos empleados en los materiales poliméricos.

ADITIVOS	FUNCIÓN QUE DESEMPEÑAN	TIPOS
Cargas	Modifican propiedades físicas, especialmente mecánicas.	Carbonato cálcico, Óxido de titanio, Talco, Caolín, Barita.
Plastificantes	Aumentan la flexibilidad	Ftalatos, Trimelitados, Fosfatos, Plastificantes poliméricos.
Antioxidantes	Evitan la degradación de la cadena polimérica por la acción del oxígeno.	Fenoles, Aminas, Compuestos de azufre.
Antiozonizantes	Previenen la degradación en los cauchos por efecto del ozono.	Derivados de aminas.
Estabilizantes térmicos	Previenen la degradación en polímeros halogenados.	Compuestos de cadmio y bario.
Absorbentes de luz UV	Evitan la degradación de la macromolécula provocada por la radiación UV.	Benzofenonas, Benzotriazoles.
Ignífugos	Disminuyen o retrasan el carácter inflamable del polímero.	Compuestos orgánicos de bromo y cloro, compuestos de fósforo y boro.
Pigmentos	Aportan color y opacidad al material polimérico.	Óxido de titanio, Negro de humo, Óxidos de hierro y Cromatos de cinc.

2.3. TIPOS DE GEOMEMBRANAS POLIMÉRICAS

Las geomembranas poliméricas empleadas en impermeabilización se suelen presentar de cuatro formas distintas (Blanco, 2005; MARM 2010):

Geomembranas homogéneas. Constituidas exclusivamente por el material polimérico y los aditivos. Dentro de este tipo se encuentran las geomembranas de polietileno de alta, media y baja densidad.

Geomembranas multicapa. Formadas por una serie de capas que pueden ser del mismo o de distintos materiales. De este modo, se pueden conseguir mejorar las propiedades mecánicas, propiedades de retracción y protección ultravioleta. Las láminas de poli(cloruro de vinilo) plastificado (PVC-P) suelen fabricarse con este sistema y es corriente observar dos colores en la lámina, siendo la capa externa la que lleva mayor cantidad de aditivos para la protección ultravioleta y la interna con mayor proporción de biocidas y fungicidas para protección del ataque por microorganismos del terreno.

Geomembranas con refuerzo o armadas. En estas láminas, el material polimérico lleva inserciones de fibras, velos o tejidos. Los materiales de refuerzo comúnmente utilizados para estos fines, son la fibra de vidrio que proporciona mayor estabilidad dimensional y el tejido de hilos sintéticos, fundamentalmente de poliéster, que mejora ciertas propiedades mecánicas. Las láminas de poli(cloruro de vinilo) plastificado, polipropileno, polietileno clorosulfonado y polietileno de muy baja densidad, son un ejemplo típico de este tipo de geomembranas, siendo el tejido de hilos sintéticos el refuerzo mayormente empleado.

Geomembranas revestidas. Se denominan así a las geomembranas que llevan externamente un velo, tejido u otro refuerzo para evitar tensiones en el proceso de fabricación o bien para reforzar su resistencia mecánica. Las geomembranas de poliisobutileno, de gran implantación en Centroeuropa, suelen comercializarse revestidas por una de sus caras con un tejido sintético. Últimamente se están utilizando geomembranas de PVC-P en obras como en el Canal de Panamá, embalse de Tampa (USA) y la presa de Camporredondo. (Vale et al. 2015, Crespo 2016)

2.4. REQUERIMIENTOS EXIGIBLES A LAS GEOMEMBRANAS

Las cualidades exigibles a las geomembranas que constituyen los sistemas de impermeabilización dependerán de su propia naturaleza y de los requerimientos de la obra en la que vayan a instalarse. Los principales requerimientos exigidos a las geomembranas

están recogidos en la norma europea de barreras geosintéticas UNE EN 13361 (AENOR 2013) y reflejadas, a nivel nacional, en el Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas (MARM 2010).

2.4.1. MECÁNICOS

Las características de tracción es uno de los requisitos que se exigen a todos los materiales poliméricos, ya que representan una fuente de información importante para evaluar su comportamiento. La determinación de las características de tracción va acompañada de la deformación tanto a rotura como en la carga máxima.

Cuando las geomembranas presentan dos o más capas, la adherencia entre ellas se considera una característica importante para determinar la posible deslaminación de la geomembrana lo que daría lugar a un deterioro del sistema de impermeabilización.

La resistencia al desgarro es un factor a tener en cuenta en estos materiales debido a que muestran una facilidad a romper una vez que se ha producido una entalla en la geomembrana.

La resistencia al impacto dinámico y al impacto estático (perforación o punzonamiento) son determinantes para evaluar el comportamiento de las geomembranas una vez instaladas. Desde el punto de vista estático, la prueba de punzonamiento proporciona datos de interés acerca del material sometido a la presión del agua y en contacto con el soporte. Una mala compactación, un lavado de taludes, una rotura y contracción del geotextil protector hacen aflorar una serie de materiales pétreos que pueden dar lugar a la rotura de la geomembrana (Blanco 2005).

2.4.2. TÉRMICOS

El doblado a bajas temperaturas se ha considerado como una característica prioritaria y posiblemente puede sustituir a las pruebas mecánicas en la evaluación de un material que ha sido ensayado a lo largo del tiempo.

La estabilidad dimensional, prueba realizada a elevadas temperaturas, se debe considerar necesaria en todos los materiales poliméricos, ya sean elastoméricos o termoplásticos.

2.4.3. DURABILIDAD

Las propiedades de durabilidad relacionadas con el envejecimiento en sus distintas vertientes: ozono, calor, natural y acelerado, son de gran interés para predecir el comportamiento en obra de un material determinado, máxime cuando éste va a estar totalmente expuesto a la intemperie.

El envejecimiento térmico se debe realizar sobre todo tipo de materiales, mientras que el acelerado debe centrarse en los materiales de clases I y II (Tabla 2.1).

Por el contrario, la resistencia al ozono debe llevarse a cabo sobre materiales en cuya estructura polimérica haya abundancia de dobles enlaces, que son susceptibles de ser destruidos por un proceso de adición electrófila. Esta degradación por ozono tiene lugar aún cuando la concentración del mismo en la atmósfera sea muy baja y, es particularmente importante, cuando el material se encuentra sometido a un esfuerzo de tracción. El ataque por las radiaciones procedentes del sol, es una de las causas fundamentales de la degradación de los materiales sintéticos, por lo que las pruebas de envejecimiento son de carácter prioritario, máxime en países con abundancia de radiaciones solares, como es el caso de España.

Íntimamente relacionados con la durabilidad se encuentran las pruebas de resistencia química y a los microorganismos. En la primera de ellas, no se fija un tipo de reactivo, si bien está orientada en el sentido de productos que puedan tener una relación directa con la impermeabilización, como pueden ser sustancias básicas como el hormigón de un talud. La acción de los microorganismos es un tema complejo, ya que la gran cantidad de hongos, bacterias y otros elementos biológicos que puedan atacar al material hace difícil abordar el problema con éxito.

2.4.4. OTRAS CARACTERÍSTICAS

El comportamiento al agua, tanto en la absorción como extracción, es una prueba a tener en cuenta cuando se habla de sistemas de impermeabilización. Por un lado, una elevada absorción de agua puede dar lugar a cambios dimensionales sustanciales en la geomembrana, hecho que habría que tener presente a la hora del diseño del sistema de impermeabilización. Por otro lado, la extracción de diversos aditivos que puede tener lugar por el agua, conlleva una pérdida importante de las características iniciales del material.

La resistencia al betún se debe llevar a cabo en materiales que puedan estar en contacto con estos productos hidrocarbonados. Las geomembranas de PVC-P son particularmente sensibles a los productos bituminosos. Asimismo, la resistencia a las raíces es una característica a considerar en el comportamiento de una geomembrana debido a la cercanía de especies vegetales en el entorno de las estructuras hidráulicas impermeabilizadas.

Finalmente, una de las determinaciones importantes a tener en cuenta es la resistencia a la soldadura entre los paños de la geomembrana. La unión entre paños de distintas láminas que conforman la impermeabilización de un embalse es una característica de instalación o puesta en obra, más que intrínseca del material. La unión entre paños, para lograr la continuidad de la impermeabilización, se puede realizar por diversos métodos entre los que destacan la soldadura por calor, disolventes, vulcanización y mediante otros procedimientos que dependen de la clase y naturaleza del polímero. Así, mientras un poli(cloruro de vinilo) plastificado puede unirse mediante disolventes como la ciclohexanona o el tetrahidrofurano, el caucho butilo necesita el empleo de adhesivos especiales. El tema es de vital importancia, puesto que de nada sirve la gran calidad de un material si las juntas o uniones entre paños son deficientes.

Los requerimientos exigibles a las geomembranas mencionados en este apartado se resumen en la Tabla 2.4, donde se expone un cuadro comparativo de las características generales más representativas en el campo de la impermeabilización.

Tabla 2.4. Valoración de las características para distintos materiales (MARM 2010)

CARACTERÍSTICA	MATERIAL													
	EVA/C	PEAD	PELBD	PEMBD	PEC	PIB	PVC	TPO	PP	CSM	CR	IIR	EPDM	POE
Refuerzo				SI		SI	SI	SI	SI	SI			SI	SI
Características de tracción	B	E	E	E	A	B	A	A	B	B	A	A	A	B
Resistencia al desgarro	E	E	E	E	A	B	A	B	E	E	R	R	R	E
Punzonamiento Dinámico	A	E	B	B	B	B	B	B	B	B	R	R	R	B
Punzonamiento Estático	E	R	A	E	B	B	B	E	B	R	E	E	E	E
Resistencia radiaciones UV	B	E	B	A	B	B	A	B	B	B	E	E	E	E
Resistencia al ozono	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	R	R	B	E
Resistencia de la soldadura: Soldabilidad	B	B	B	E	E	B	E	E	A	A	R	R	R	E
Resistencia de la soldadura: Pelado	B	E	E	E	B	B	B	B	B	B	R	R	R	B
Facilidad de instalación	B	E	E	E	E	B	E	E	B	B	B	B	B	E
Reparabilidad	A	E	E	E	E	A	E	E	A	R	R	R	R	E
A: Aceptable; B: Bueno; E : Excelente; R: Regular														

La Asociación Española de Impermeabilización, en el año 1996, elaboró una recopilación de datos referentes a la cantidad de geomembranas sintéticas utilizadas en impermeabilización. Los datos que figuran en la Tabla 2.5 muestran las geomembranas más utilizadas en impermeabilización: poli(cloruro de vinilo), polietileno de alta densidad y caucho de etileno-propileno-dieno monómero.

Tabla 2.5. Geomembranas sintéticas utilizadas en impermeabilización en el año 1996.
Datos expresados en m² (Blanco 2005)

Material	Cubiertas	Obras Hidráulicas	Vertederos y Túneles	Total
PVC-P	3.100.000	3.085.000	1.050.000	7.235.000
PEAD	-	2.130.000	775.000	2.905.000
EPDM-IIR	200.000	500.000	-	700.000
CSM	19.000	-	-	19.000
TOTAL	4.000.000	6.500.000	2.000.000	12.500.000

A continuación se exponen las características junto con los valores mínimos exigidos a las geomembranas de PVC-P, PEAD y EPDM (Tablas 2.6 y 2.7). Estos valores figuran en el “Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas” (MARM 2010) y se determinaron con objeto de aportar un mayor conocimiento de estos materiales, y así poder subsanar el vacío de la norma europea, ya que ésta no contempla exigencias en estas geomembranas impermeabilizantes.

Tabla 2.6. Valores mínimos exigibles a las geomembranas de PVC-P reforzado

CARACTERÍSTICAS	PVC-P
Espesor, mm	1.5
Resistencia a la tracción, N/50 mm	1100
Alargamiento en el punto de carga máxima, %	15
Resistencia al desgarro, N	130
Doblado a bajas temperaturas, (sin grietas)	-20
Resistencia al impacto dinámico: altura del percutor, mm	500
Resistencia al punzonamiento: recorrido del percutor, mm	12

Tabla 2.7. Valores mínimos exigibles a las geomembranas homogéneas de PEAD y EPDM.

CARACTERÍSTICAS	PEAD	EPDM
Espesor, mm	1.5	1.5
Resistencia a la tracción, MPa	25	9
Esfuerzo en el punto de fluencia, MPa	17	-
Esfuerzo al 300% del alargamiento, MPa	-	6.0
Alargamiento en rotura, %	700	400
Alargamiento en el punto de fluencia, % (máximo)	17	-
Doblado a bajas temperaturas (sin grietas)	-75	-55
Resistencia al desgarro, N/mm	140	35
Resistencia impacto dinámico: altura del percutor, mm	500	300
Resistencia punzonamiento: recorrido del percutor, mm	8	30
Contenido en negro de humo, %	2.0-3.0	-

A continuación se realiza una descripción general de la composición y características de las geomembranas de PEAD, EPDM y PVC-P. La descripción de la composición, características y procesos de degradación de la geomembrana de PVC-P se va a detallar de una forma más exhaustiva debido a que es el objeto de estudio en este trabajo.

2.5. GEOMEMBRANAS DE POLIETILENO

El polietileno es la poliolefina más sencilla en términos de estructura química. Su macromolécula está formada por unidades monoméricas de etileno dando lugar a una cadena molecular lineal que, en teoría no contiene carbonos terciarios por lo que su oxidación es bastante difícil (Figura 2.1). No obstante, en ocasiones la cadena macromolecular presenta algún carbono terciario procedente de procesos secundarios de polimerización o de copolimerización con otros monómeros.

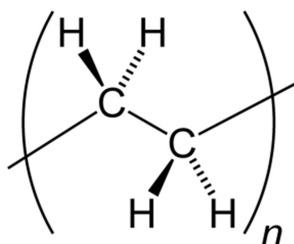


Figura 2.1. Unidad monomérica del polietileno.

Los átomos de hidrógeno unidos a carbonos terciarios tienen una energía de disociación más baja que los unidos a carbonos primarios o secundarios, esto significa que es más fácil que se conviertan en radicales libres susceptibles de provocar reacciones de degradación. Por lo tanto, un polietileno con mayor densidad de ramificaciones llegará a generar mayor cantidad de radicales libres que un polietileno con pocas ramificaciones. Esto explica, que casi siempre se incorpore al proceso de fabricación de la geomembrana una pequeña cantidad de antioxidantes, entre otros aditivos, con objeto de evitar la degradación, ya sea durante el periodo de fabricación, o bien una vez instalada la geomembrana en obra.

Los diferentes tipos de polietileno se clasifican en función de la densidad de la resina. Las tres clases comúnmente utilizadas en la fabricación de geomembranas junto con sus densidades son:

- Polietileno de alta densidad (PEAD). Presenta una densidad superior a 0.940 g/cm^3 .
- Polietileno de media densidad (PEMD). La densidad se encuentra comprendida entre 0.926 y 0.940 g/cm^3 .
- Polietileno lineal de baja densidad (PELBD). La densidad se encuentra comprendida entre 0.919 y 0.925 g/cm^3 .
- Polietileno de muy baja densidad, con densidades inferiores a 0.919 g/cm^3 .

La utilización de una resina de alta densidad para confeccionar una geomembrana de PEAD llevaría consigo la obtención de una lámina con unas características mecánicas excelentes, pero una difícil puesta en obra y todavía una más complicada unión entre paños. Por este motivo, las geomembranas de PEAD suelen estar fabricadas con resinas de polietileno de media densidad, las cuales, mediante la adición de negro de carbono y otros aditivos, consiguen alcanzar una densidad de 0.940 g/cm^3 requerida. Pero lo más habitual, es emplearlo en forma de copolímero con otro monómero tipo α -olefinas como buteno, hexeno y octeno en unas condiciones de baja presión y temperatura. El tipo de co-monómero, así como la cantidad empleada en la síntesis del polietileno influyen notablemente en las características químicas y mecánicas del mismo (Hsuan et al. 2008).

La composición de la geomembrana de polietileno, según Rowe y Sangam, (2002), está formada por un 96-97,5% de resina, 2-3% de negro de carbono y 0.5-1.0% de aditivos como estabilizantes UV y antioxidantes mientras que Koerner (2005), describe la composición de la misma geomembrana con un 96-98 % de resina, un 2-3 % de negro de carbono y un porcentaje de aditivos comprendido entre el 0.5-2 %. Las diferencias en la composición no son relevantes, siendo una de ellas la cantidad de aditivos en la geomembrana que, si bien es pequeña, es necesaria para proteger la resina polimérica de la acción de las radiaciones ultravioletas.

Estudios más recientes indican que lo habitual es la utilización de una geomembrana formada por dos resinas: polietileno de alta densidad y α -octeno (Pons 2012, Blanco 2015). En la Tabla 2.8 se presenta la formulación más común empleada en la actualidad para la fabricación de láminas de PEAD (Blanco 2016).

Tabla 2.8. Formulación de una geomembrana de PEAD.

COMPUESTO	CANTIDAD, %
PEAD + α -Octeno	95-98
Negro de carbono	2-3
Otros aditivos	0.5-1

2.5.1. ADITIVOS

El **negro de carbono** es uno de los aditivos más importantes en las geomembranas de polietileno. Se emplea como estabilizante ultravioleta de forma que actúa absorbiendo la radiación UV y disipando la energía absorbida en forma de calor. El comportamiento óptimo del negro de carbono está basado en el tamaño de partícula empleado y la dispersión dentro de la matriz polimérica.

La cantidad de negro de carbono que se incorpora a la resina polimérica está comprendida entre el 2 y el 3%. Cantidades inferiores serían insuficientes para evitar la degradación por las radiaciones solares. Proporciones mayores conllevarían una pérdida importante de propiedades, sobre todo mecánicas, ya que estaríamos sustituyendo sustancias poco nobles como son las cargas por el producto noble que es la resina. La utilización del negro de carbono, como absorbente de la radiación UV, se debe a sus costes relativamente bajos. Si es importante el contenido en negro de carbono correcto, más aún es su adecuada dispersión. El aditivo debe estar repartido de una forma homogénea en toda la superficie de la lámina, pues de lo contrario las características pueden variar notablemente de unos puntos a otros y dar lugar a fallos mecánicos y degradación del polímero por el ataque de la radiación solar; los primeros en los lugares donde haya altas concentraciones de negro de carbono, los segundos donde haya escasez del mismo (Blanco et al. 2008a, Blanco 2012).

Los **antioxidantes** forman parte de la formulación de la geomembrana de polietileno con el propósito de prevenir la oxidación durante el proceso de extrusión y para asegurar la

estabilidad del polímero durante su tiempo de vida útil. Existen muchos tipos de antioxidantes, los cuales se encuentran englobados en cuatro importantes familias de compuestos químicos. Estas familias se dividen, a su vez, en primarios y secundarios dependiendo de su función química.

Los **antioxidantes primarios** actúan atrapando o desactivando radicales libres, de forma que pueden donar electrones a los radicales libres para dar lugar a compuestos neutros o bien, son aceptores de electrones que reaccionan con radicales libres, para dar lugar al polímero estabilizado. Un ejemplo lo constituyen los compuestos químicos derivados de fenoles y aminas impedidas estéricamente.

Los **antioxidantes secundarios** están diseñados para descomponer los hidroperóxidos en alcoholes y de esta forma prevenir la formación de radicales libres en el proceso de degradación de la geomembrana de polietileno. Un ejemplo lo constituyen los compuestos derivados de fosfitos orgánicos, compuestos de azufre (Tiosinérgicos) y aminas impedidas estéricamente (Hsuan y Koerner, 1998; Hsuan et al. 2008).

Tanto los antioxidantes primarios como secundarios son estables en diferentes rangos de temperatura, de forma que la geomembrana se mantiene protegida durante su procesado, en el que soporta elevadas temperaturas, y en su puesta en servicio a temperatura ambiente.

2.5.2. FABRICACIÓN DE LAS GEOMEMBRANAS DE PEAD

La obtención de las geomembranas de PEAD se realiza mediante la combinación de las técnicas de extrusión, soplado y calandrado. Desde el punto de vista de los materiales poliméricos, la extrusión es uno de los procesos más importantes de transformación. Aunque existen extrusoras de diferentes tipos, las más utilizadas son las de tornillo o usillo simple. Un esquema de este tipo de extrusora se muestra en la Figura 2.2.

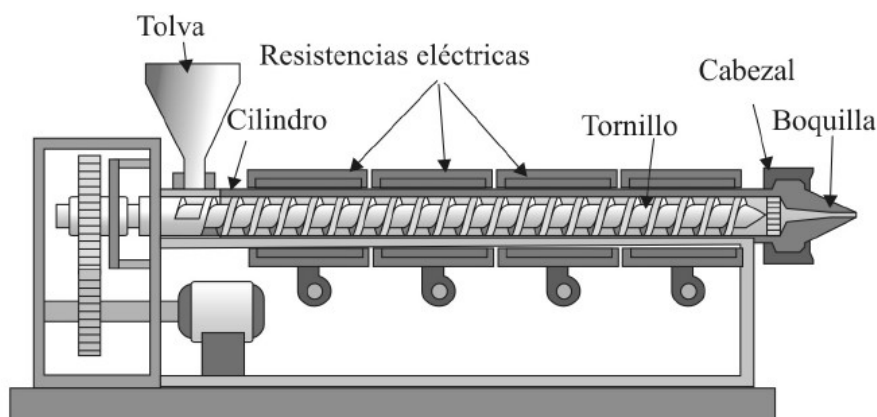


Figura 2.2. Representación esquemática de una extrusora de husillo sencillo (Beltrán y Marcilla 2012)

La resina de polietileno junto con los aditivos se introducen en la tolva de alimentación y de ahí pasan al interior del cilindro, el cual se encuentra caliente gracias a unas resistencias eléctricas. En el cilindro, en la parte más alejada de la tolva de alimentación se acopla un cabezal cuya boquilla de salida tiene el diseño adecuado para que tenga lugar el conformado del producto. La parte esencial de las extrusoras es el sistema cilindro-tornillo que, como consecuencia del giro compacta la resina sólida, la funde y transporta hacia la boquilla produciendo al mismo tiempo la presurización y el mezclado del material (Beltrán y Marcilla 2012).

Posteriormente, el material extrusionado pasa a un sistema de calandras, con el que consigue el espesor deseado de la geomembrana. El espesor mínimo exigido para las geomembranas de PEAD es de 1.5 mm, no obstante, es preferible y recomendable el espesor de 2.0 mm (MARM 2010).

2.5.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS GEOMEMBRANAS DE PEAD

El polietileno de alta densidad es un polímero de elevada resistencia a la degradación debido a su estructura química. Las diferentes condiciones de polimerización del etileno dan lugar a polietilenos con diferente densidad y cristalinidad. Las propiedades físicas y mecánicas se encuentran relacionadas con la densidad de la resina polimérica.

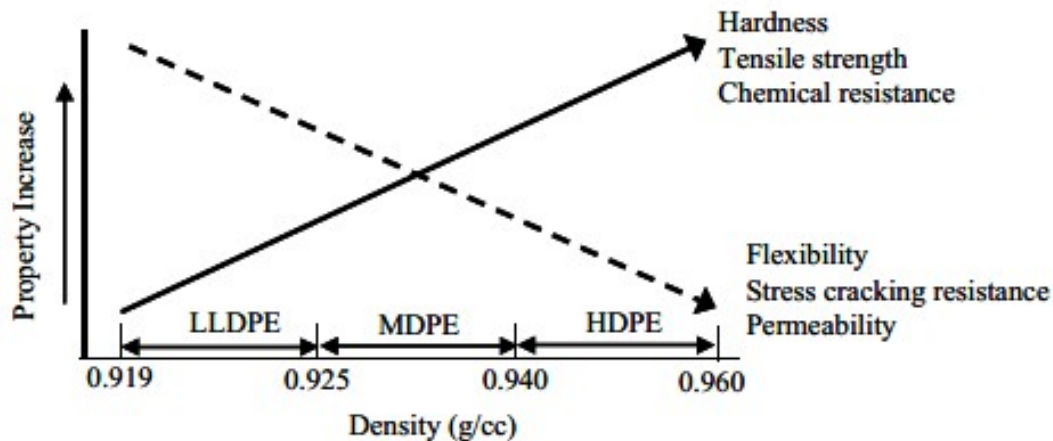


Figura 2.3. Relación entre la densidad del polietileno y sus propiedades (Hsuan et al. 2008).

La Figura 2.3 muestra como las propiedades de dureza, resistencia a la tracción y resistencia química aumentan a medida que aumenta la densidad del polietileno mientras que disminuyen otras como la flexibilidad, la permeabilidad y la resistencia a la fisuración en un medioambiente activo (“stress-cracking”).

Las geomembranas de PEAD presentan un buen comportamiento en la resistencia mecánica a la percusión o impacto dinámico, en cambio su resistencia al impacto estático (punzonamiento) no es tan buena como cabría esperar.

Respecto a la prueba de flexibilidad a bajas temperaturas, la geomembrana de PEAD presenta un buen comportamiento a -75°C . La experiencia del Área de Materiales del CEDEX, a lo largo de su labor de seguimiento en las balsas estudiadas en la Península y en las Islas Canarias, hizo que esta temperatura se mantuviera en la prueba de flexibilidad a bajas temperaturas y se recomendase en el Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas (MARM 2010).

2.5.4. DEGRADACIÓN DE LAS GEOMEMBRANAS DE PEAD

Durante toda su vida útil, las geomembranas de PEAD están expuestas a mecanismos de envejecimiento que afectan a sus propiedades. Algunos agentes medioambientales tienen un impacto significativo en los materiales poliméricos de forma que reducen su durabilidad. Los procesos de envejecimiento resultan ser una combinación de carácter físico y químico (Hsuan y Koerner 1995, 1998).

El envejecimiento físico no afecta a la estructura de las macromoléculas, esta degradación del polímero se caracteriza porque tienen lugar procesos de transferencia de masa entre la geomembrana y el medio que la rodea (extracción de aditivos y absorción de disolventes, etc.), o bien se producen mecanismos que modifican la organización interna de las cadenas poliméricas dando lugar a un cambio en su morfología (orientación de cadenas, cambios en la cristalinidad, etc.) (Kay et al. 2004).

El envejecimiento o degradación química afecta a la estructura molecular del polímero. Los mecanismos de degradación dan lugar a escisiones de las cadenas macromoleculares o bien por el contrario, a entrecruzamiento (“cross-linking”) entre las cadenas del polímero mediante la formación de enlaces entre ellas. La degradación termooxidativa, la fotodegradación, la degradación microbiológica y los procesos de hidrólisis son los principales mecanismos de envejecimiento químico de las geomembranas poliméricas. Cada uno de estos procesos de degradación provoca un cambio en las propiedades mecánicas de la geomembrana disminuyendo su tiempo de vida útil.

Los procesos más representativos de la degradación de la geomembranas de PEAD son el agrietamiento por esfuerzos medioambientales y la degradación termooxidativa.

Agrietamiento por esfuerzos medioambientales

El proceso de agrietamiento por esfuerzos medioambientales también llamado “stress-cracking” tiene lugar en las geomembranas de PEAD debido a la elevada cristalinidad que presenta este polímero, aproximadamente entre un 40-50 % (Rowe y Sangam 2002). Este agrietamiento se produce cuando la geomembrana está bajo la acción de agentes externos, del tipo de tensoactivos, y a la vez está sometida a un esfuerzo constante.

Una explicación de este proceso de degradación la aporta Lustiger (1985) describiéndolo como un mecanismo en el que forman parte las fases cristalinas y amorfas del PEAD. Las cadenas macromoleculares están organizadas en fases cristalinas y amorfas. Algunas de estas cadenas actúan de enlace entre estas dos fases, manteniendo adyacentes las estructuras cristalinas. Cuando la geomembrana está en contacto con determinados agentes y sometida a un esfuerzo constante se produce el deslizamiento de las cadenas macromoleculares en la fase amorfa, dando lugar a la fractura y separación de la fase cristalina (Noval et al. 2014b, Blanco et al. 2016c). Este proceso se representa en la Figura 2.4.

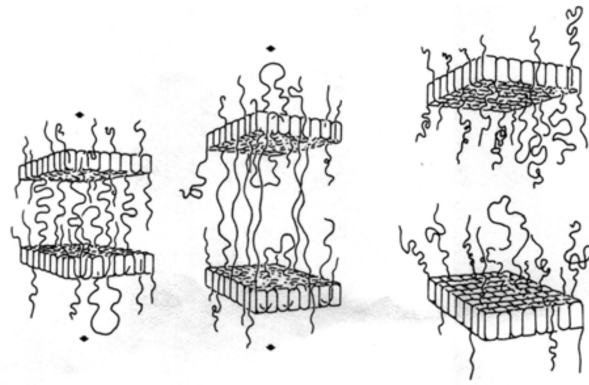


Figura 2.4. Mecanismo de rotura de las cadenas macromoleculares en el PEAD.

Existen numerosos estudios que ponen en evidencia esta degradación en el polietileno de alta densidad. Peggs y Carlson (1989) realizaron un estudio en diferentes tipos de geomembranas de PEAD, Rowe et al. (1998) estudiaron esta degradación en una geomembrana instalada durante 14 años en una laguna de lixiviados y Hsuan (2000) evaluó la resistencia de varias geomembranas de PEAD en laboratorio basándose en dos métodos de ensayo (ASTM 2012 y ASTM 2016) llegando a registrar la rotura del material frente al esfuerzo aplicado.

Las principales conclusiones de estos trabajos de investigación se pueden resumir, en primer lugar, en que la mayoría de las roturas se asocian con geomembranas que soportan tensiones inducidas por la temperatura y, en segundo lugar, en que las grietas aparecen principalmente en las discontinuidades formadas por la unión de geomembranas, utilización de parches y zonas con rasguños, ya que en estas zonas es donde se registra mayor concentración de esfuerzos.

Degradación termooxidativa

La degradación oxidativa es especialmente nociva en las geomembranas de polietileno, ya que se producen por la acción del oxígeno, iniciando un proceso controlado por reacciones provocadas por radicales libres. El mecanismo que describe este tipo de degradación se muestra en la Figura 2.5. Se observa como los procesos de degradación son cíclicos, comenzando por la acción del oxígeno en las cadenas macromoleculares y la propagación de los radicales libres formados. Asimismo, se puede destacar la acción de los antioxidantes primarios en las zonas marcadas con (a) (b) y (e) y la acción de los antioxidantes secundarios en las zonas (c) y (d)

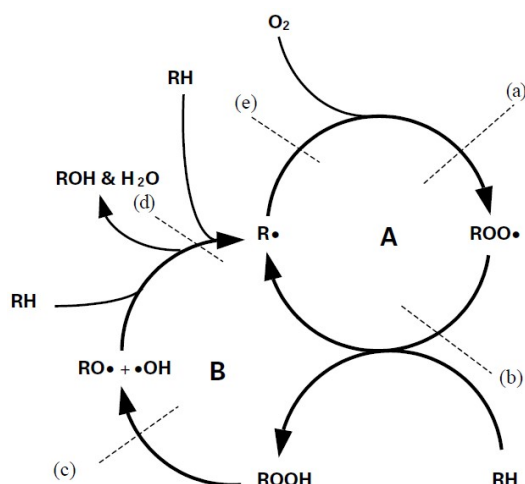


Figura 2.5. Ciclos de oxidación en el polietileno (modificado de Grassie y Scott, 1985).

Hsuan y Koerner (1998) describen el proceso de degradación termooxidativa en el polietileno como un mecanismo en tres etapas: en primer lugar comienza la pérdida de los antioxidantes, en segundo lugar existe un periodo de inducción en el que comienza la degradación lenta del polímero y en tercer lugar se produce la degradación del polímero. Como consecuencia de este proceso, la geomembrana experimenta un cambio importante en el índice de fluidez ya que está relacionado con el peso molecular del polímero. Igualmente, se produce una disminución de las propiedades mecánicas, tales como la resistencia a la tracción y alargamiento en la rotura provocando el fin de la vida útil de la geomembrana.

2.6. GEOMEMBRANAS DE EPDM

Los cauchos de copolímero de etileno-propileno fueron uno de los primeros productos obtenidos con catalizadores Ziegler-Natta y comenzaron a comercializarse hacia 1955.

En la reacción de polimerización, los dos monómeros, etileno y propileno, se añaden en proporciones prácticamente iguales y se distribuyen en la cadena más o menos al azar, por lo que el material resultante es amorfo (Brydson 1995).

La vulcanización de este polímero se hacía bastante difícil por métodos convencionales a base de azufre debido a que en la cadena macromolecular no existen dobles enlaces. El entrecruzamiento en este caso se hace mediante la adición de peróxidos aunque se emplea azufre como covulcanizante.

Con objeto de subsanar este complicado proceso de vulcanización, en la reacción de polimerización se introduce o se adiciona un tercer monómero que es el que aporta los dobles enlaces para conseguir el entrecruzamiento posterior. En un principio, el dieno utilizado fue el 1,3 butadieno, posteriormente, se emplearon el 1,4-hexadieno, 5-vinil-2-norborneno (VNB), dicitopentadieno (DCPD) y 5-etiliden-2-norborneno (ENB) (Figuras 2.6 a 2.9).

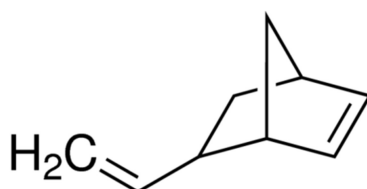


Figura 2.6. 5-Vinil-2-norborneno (VNB)

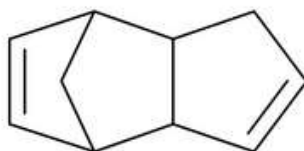


Figura 2.7. Dicitopentadieno (DCPD).

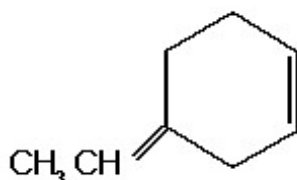


Figura 2.8. 5-etiliden-2-norborneno (ENB).

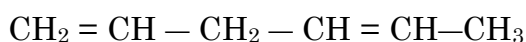


Figura 2.9. 1,4 – Hexadieno.

El terpolímero EPDM sintetizado con ENB adquiere mejores prestaciones y una durabilidad elevada. La estructura de la macromolécula del EPDM con 5-etiliden-2-norborneno como dieno se representa en la Figura 2.10.

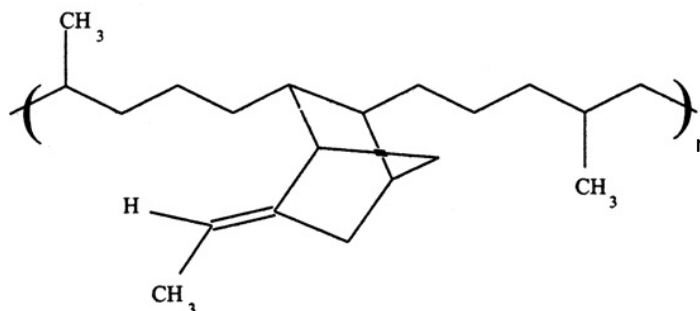


Figura 2.10. Estructura química del EPDM con 5-etiliden-2-norborneno.

Los dos dienos más utilizados en la síntesis del caucho de EPDM son el dicitopentadieno y el 5- etiliden-2-norborneno. Cada uno de estos dienos aporta unas características específicas que influyen en el procesado y grado de vulcanización.

➤ **Dicitopentadieno**

- Presenta una vulcanización lenta con azufre
- Proporciona una elevada cantidad de cadenas largas ramificadas
- Presenta una buena resistencia a la compresión

➤ **5-etiliden-2-norborneno**

- Presenta un alto grado de vulcanización y mayor rapidez en el curado
- Proporciona una pequeña cantidad de cadenas largas ramificadas
- Aporta buena resistencia a la tracción y compresión

En resumen, se puede considerar al EPDM como una macromolécula cuya cadena principal está formada por un copolímero en bloque de etileno y propileno, y de esa cadena principal pende una secundaria a modo de injerto donde cuelga el dieno. Este dieno se une a la cadena principal por uno de sus dobles enlaces y el otro que queda libre es en el que tiene lugar la vulcanización.

Según Koerner (2005) la formulación de una geomembrana de EPDM está compuesta por un 25-30% de resina polimérica, un 20-40% de cargas, un 20-40% de negro de carbono y entre un 1-5% de aditivos como estabilizantes y antioxidantes. Estudios más recientes, indican que una geomembrana de EPDM, en la actualidad, suele estar compuesta por los componentes que se indican en la Tabla 2.9 (Blanco 2016).

Tabla 2.9. Formulación de una geomembrana de EPDM.

COMPUESTO	CANTIDAD, %
Etileno+Propileno+Monómero diénico	25-40
Negro de carbono	20-40
Aceites parafínicos	10-20
Otros Aditivos: Antioxidantes Estabilizantes Arcillas, Azufre, Aceleradores	8

2.6.1. ADITIVOS

La geomembrana de caucho de EPDM requiere de una mayor cantidad de aditivos debido a su naturaleza polimérica. Los aditivos que forman parte de la formulación del EPDM van desde los agentes de curado y activadores de la vulcanización, aceites para mejorar los procesos de fabricación y reducir la viscosidad del material hasta los estabilizantes que disminuyen el efecto de las radiaciones ultravioletas en la resina polimérica (Tabla 2.10).

Tabla 2.10. Aditivos de las geomembranas de EPDM.

ADITIVOS	FUNCIÓN	COMPUESTOS
Catalizadores	Polimerización controlada y específica	Sales de vanadio, haluros de alquil-aluminio y metallocenos.
Agentes de curado	Vulcanización	Azufre y peróxidos
Activadores de la vulcanización	Mejoran el tiempo de vulcanización y reducen la temperatura de dicho proceso.	Óxido de cinc
Aceleradores de la vulcanización	Reducen el tiempo de vulcanización	Benzotiazoles, Ditiocarbamatos
Aceites	Facilitan el procesado en la fabricación de la geomembrana reduciendo la viscosidad de la mezcla polimérica	Aceites parafínicos y aromáticos
Estabilizantes UV	Capturan radicales libres	Negro de Carbono
Cargas	Mejoran la estabilidad dimensional y propiedades ignífugas	Arcillas

2.6.2. FABRICACIÓN DE LAS GEOMEMBRANAS DE EPDM

La producción de la geomembrana de EPDM se lleva cabo, en primer lugar, con el mezclado de la resina y los aditivos. Después del mezclado y antes de la vulcanización se hace pasar por un sistema similar al calandrado para obtener láminas de gran anchura. Estas láminas aún sin curar son un producto “pegajoso” por lo que se debe aplicar un agente antiadhesivo, cuando se enrollan para someterlas posteriormente al proceso de vulcanizado. Las láminas se introducen en una autoclave donde tiene lugar la vulcanización consiguiendo de esta forma que el terpolímero se convierta en un material termoestable.

Finalmente, las geomembranas se trasladan a los equipos de enrollado y cortado para proceder a su comercialización. Una particularidad de la producción de las geomembranas de EPDM es que se fabrican con anchuras más elevadas que otras geomembranas. A modo de ejemplo, Firestone (2013) produce geomembranas de EPDM con una anchura comprendida entre 3.05 m y 15.25 m.

2.6.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS GEOMEMBRANAS DE EPDM

El caucho de EPDM presenta una buena resistencia al envejecimiento y al ozono debido a su estructura química. La densidad de dobles enlaces presentes en sus macromoléculas disminuye debido al proceso de vulcanización, lo que da lugar a una buena resistencia al ataque de agentes externos en la geomembrana. En cuanto a compuestos químicos, es atacado por aceites de petróleo y gasolina.

Una de las propiedades importantes que presenta la geomembrana es su elevada flexibilidad a las bajas temperaturas, ofreciendo unos resultados positivos a -55°C.

Su resistencia al impacto estático (punzonamiento) es elevada lo que le permite una buena resistencia a la posible perforación de los áridos presentes en el terreno.

Respecto a las características de tracción se puede señalar que prácticamente se mantienen invariables con el tiempo, el módulo de elasticidad experimenta un incremento mientras que el alargamiento hasta la rotura disminuye de forma notable a lo largo del tiempo. Otra de las propiedades que varía en las geomembranas de EPDM es su dureza, detectándose un aumento a lo largo del tiempo (Blanco et al. 2011, 2013a, 2014a,b).

No obstante, las geomembranas de EPDM presentan desventajas como son su baja resistencia al desgarro y su baja resistencia al impacto dinámico, aunque esta propiedad mejora con el tiempo debido a los procesos de entrecruzamiento.

Un dato importante es el que aporta la firma Firestone respecto al primer uso de las geomembranas de caucho en los embalses de riego ubicados en el sur de España. Geomembranas instaladas en 1973 presentan un buen comportamiento incluso después de muchos años de exposición a los rayos UV y al ozono, lo que significa que siguen cumpliendo con su función impermeabilizante hasta nuestros días (Firestone 2013). Pero las geomembranas utilizadas en ese momento eran de caucho butilo (IIR) y caucho de cloropreno (CR) lo cual significaba que podían ser atacadas por el ozono por presentar dobles enlaces en su cadena principal. Las primeras láminas de EPDM se colocaron en el embalse de El Golfo (Isla de El Hierro) y en el de El Boquerón (Isla de Tenerife), así como en la zona de los Pirineos franceses (Blanco et al. 2012a).

2.6.4 DEGRADACIÓN DE LAS GEOMEMBRANAS DE EPDM

El terpolímero EPDM es más estable que los cauchos butilo, cloropreno y butadieno, sin embargo a pesar de su estabilidad, presenta una comprobada tendencia a la oxidación. Se ha demostrado que en los terpolímeros sintetizados con 5-etiliden-2-norborneno, el proceso de degradación bien sea fotooxidativo o termooxidativo, comienza en el dieno, a pesar de su baja proporción (8%) y continúa hasta alcanzar la cadena molecular de etileno-propileno (Delor et al. 2000, Noval et al. 2014a, 2015).

La degradación oxidativa del EPDM ha mostrado que durante los procesos de escisión de cadena en la oxidación del terpolímero se produce una recombinación de radicales libres que da lugar a un entrecruzamiento adicional (Figura 2.11) (Baba et al. 1999). Este proceso de reticulación parece ser muy rápido si se compara con las reacciones de oxidación. Adicionalmente, se observa que el aumento del entrecruzamiento conduce a una disminución de la concentración de oxígeno en el terpolímero, lo que da lugar a una disminución en la velocidad de oxidación, de forma que esta degradación oxidativa puede llegar a detenerse. Este hecho se ha comprobado en diferentes elastómeros diénicos, tales como el caucho butilo, caucho de estireno-butadieno y caucho natural.

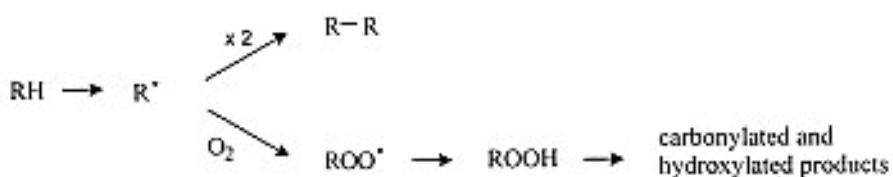


Figura 2.11. Recombinación de radicales libres en la escisión de cadenas (Baba et al. 1999).

Estudios realizados por diversos autores ponen de manifiesto que la degradación fotooxidativa tiene su inicio en impurezas que contienen grupos cromóforos en su estructura y que están presentes en el polímero EPDM. Esto contrasta con la idea de que la reacción de iniciación se haya atribuido solamente a la presencia de hidroperóxidos. (Duek et al 1990).

El estudio de la degradación del EPDM se ha determinado en terpolímeros sin aditivos. Sin embargo, es de suponer que, aunque las geomembranas se formulan con una gran variedad de aditivos, la resina polimérica de EPDM experimente el mismo proceso de entrecruzamiento en su degradación oxidativa. Esto explicaría la variación de las propiedades mecánicas tales como el aumento del módulo de elasticidad, la disminución del alargamiento hasta la rotura y el aumento de la dureza Shore A lo largo del tiempo.

La geomembrana de EPDM presenta una gran resistencia al ozono pero se ve muy afectada por las radiaciones UV que lleva consigo una gran disminución del alargamiento en rotura y un notable incremento en la dureza Shore-A (Blanco 2016d).

2.7. GEOMEMBRANA DE POLI(CLORURO DE VINILO)

2.7.1. EL PVC COMO POLIMERO

El poli(cloruro de vinilo) es un polímero de una extraordinaria utilidad que lo ha hecho uno de los materiales más comerciales durante años. De todos los materiales termoplásticos, está situado en segundo lugar en la producción mundial de poliolefinas. A pesar de su elevada inestabilidad al calor, el PVC ha conseguido mantenerse en este puesto incluso por encima de todos sus principales competidores (Starnes 2002).

Las propiedades físicas del PVC hacen que sea apropiado para adaptarse a las exigencias tecnológicas en áreas tan importantes como la construcción y el transporte. Su principal limitación es la inestabilidad frente al calor, hecho que ha dado lugar a numerosas publicaciones, durante décadas, intentando esclarecer los mecanismos de la degradación térmica del PVC, así como la búsqueda de sistemas estabilizantes sin menoscabo de sus propiedades (Millán y Martínez 1997, Castillo y Blanco 1991).

El poli(cloruro de vinilo) está formado por miles de unidades monoméricas de cloruro de vinilo. El primer método para la preparación del monómero fue descrito por Renault en 1835, el cual consistía en tratar el 1,2-dicloroetano con una disolución alcohólica de hidróxido potásico.

En el año 1872 se consiguieron dos descubrimientos importantes tanto en la síntesis del monómero cloruro de vinilo como en la polimerización. En ese mismo año se llevó a cabo la síntesis del bromuro de vinilo a partir de acetileno y bromuro de hidrógeno hecho que dio paso a la obtención del cloruro de vinilo, siguiendo la misma línea de síntesis. Este descubrimiento se convirtió en uno de los mejores métodos de preparación del cloruro de vinilo. El otro hecho importante fue la polimerización del cloruro de vinilo, llevada a cabo en tubos cerrados y expuestos a la luz del sol. A partir de este último descubrimiento surgieron numerosos trabajos de investigación en polimerización, así como varias patentes suscritas independientemente en 1928 por Carbide and Carbon Chemical Corporation y Du Pont.

Años después se consiguió un éxito de gran alcance comercial para el PVC. El químico estadounidense W.L. Semon descubrió que calentando el poli(cloruro de vinilo) con fosfato de tritolilo a 150°C se obtenía un compuesto de aspecto parecido al caucho y que permanecía homogéneo a temperatura ambiente. Se puede decir que este fue el primer compuesto de PVC plastificado (Brydson, 1995).

La polimerización del poli(cloruro de vinilo) se efectúa industrialmente en emulsión, suspensión, en bloque y en pequeña proporción en solución. La técnica empleada para la fabricación de las geomembranas de PVC es la polimerización en suspensión (Giroud y Tisinger 1993).

La polimerización del PVC en suspensión permite un mejor control de las condiciones de reacción. En este proceso de polimerización se puede variar el sistema de dispersión y velocidad de agitación para obtener un tamaño y forma de partícula adecuada. En este tipo de reacciones el agente dispersante tiene una influencia importante sobre la porosidad de

las partículas del polímero. Como ejemplo de agentes dispersantes se pueden citar, el alcohol polivinílico, copolímeros de acetato de vinilo con anhídrido maleico y ésteres de ácidos grasos con etilenglicol (Arranz 1985; Champetier y Monnerie 1973).

Uno de los mayores avances conseguidos en el conocimiento del polímero corresponde al campo de las partículas formadas durante la polimerización. Factores como la forma, el tamaño, distribución de tamaño y la porosidad de las partículas afectan de forma muy importante a las características finales del producto (Millán et al. 1985).

La estructura química del policloruro de vinilo se representa en la Figura 2.12. Las macromoléculas de PVC son esencialmente amorfas, ligeramente ramificadas, con residuos de monómero y ordenadas en secuencias denominadas cabeza-cola. Sin embargo estudios realizados por RMN indican que el PVC convencional contiene aproximadamente un 55% de tacticidad, siendo el resto de la estructura macromolecular muy atáctica.

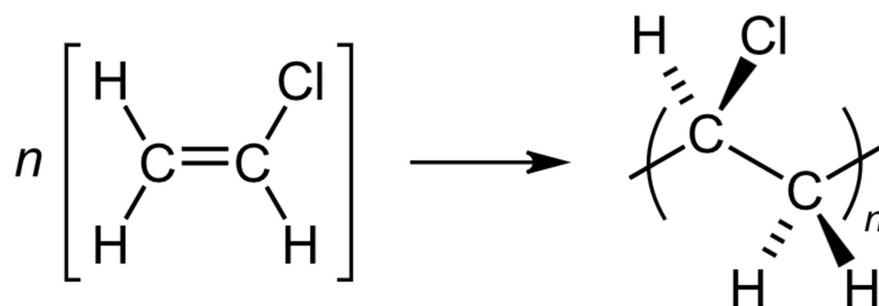


Figura 2.12. Secuencia monomérica del poli(cloruro de vinilo)

La presencia de átomos de cloro en la cadena del polímero, produce una mayor atracción entre las cadenas, debido al dipolo C-Cl, provocando en el polímero unas características físicas determinadas, tales como elevada dureza y rigidez.

El comportamiento del poli(cloruro de vinilo) está justificado por la existencia de ese dipolo, dando lugar a una temperatura de transición vítrea (T_g) cercana a los 80°C , muy superior a la del polietileno (-20°C). La T_g es la temperatura en la que las cadenas poliméricas tienen movilidad y capacidad de rotación, por tanto cualquier factor que impida esta libre movilidad del polímero hará que esta temperatura aumente. En el caso del PVC, la presencia de los átomos de cloro alternados a lo largo de las cadenas poliméricas, hace que éstas se atraigan entre sí y como consecuencia de ello, la movilidad de las mismas sea menor (Fatou 1985).

Las propiedades del PVC varían mucho dependiendo de la formulación del producto acabado. De forma general, el poli(cloruro de vinilo) sin aditivos es un material rígido e incoloro. El parámetro de solubilidad del PVC es aproximadamente $9,6 \text{ (cal/cm}^3\text{)}^{1/2}$, lo cual da idea de la resistencia del polímero a los disolventes no polares con parámetro de solubilidad inferior. Los únicos disolventes efectivos del PVC son aquellos que presentan parámetros de solubilidad parecidos a él como son el acetato de etilo, la ciclohexanona y el tetrahidrofurano, siendo estos dos últimos disolventes los utilizados en la unión entre paños en la impermeabilización en obras hidráulicas. Concretamente el tetrahidrofurano se utilizó en la impermeabilización del embalse de La Florida en Icod de los Vinos (Islas Canarias) (Crespo 2011).

En relación a las propiedades mecánicas y eléctricas del PVC, se observan comportamientos muy diferentes en función de la proporción y tipo de aditivos empleados en la formulación de sus composiciones, en especial de los plastificantes. En general, estas variaciones en las características mecánicas y eléctricas tienen su origen en el efecto de la plastificación sobre la movilidad de las cadenas del polímero.

Los inconvenientes que surgen a la hora de procesar el poli(cloruro de vinilo), debido a su rigidez y limitada estabilidad al calor, hacen que sea necesario el empleo de aditivos que lo hagan apto para su comercialización. Las temperaturas necesarias para procesar el PVC hacen que comience a sufrir una degradación importante desde el primer paso de su fabricación como geomembrana.

2.7.2. ADITIVOS

La inestabilidad del PVC frente al calor y a las radiaciones procedentes del sol hace que sus formulaciones contengan un mayor número de aditivos que otros polímeros. Las familias de aditivos generales para el PVC son: cargas, pigmentos, retardantes de llama, lubricantes, estabilizantes y plastificantes. De todos los aditivos mencionados quizá los más importantes para obtener una buena formulación del PVC son los estabilizantes, que permiten retrasar la degradación del polímero, y los plastificantes, que convierten el PVC originalmente rígido en un material polimérico flexible y fácil de procesar.

2.7.2.1. Cargas y pigmentos

Las cargas se utilizan en compuestos de PVC con objeto de reducir su coste o bien mejorar alguna característica como la dureza (recubrimiento de suelos) y las propiedades de aislantes eléctricos (cables). Se utilizan productos como el carbonato cálcico con diferentes

tamaños de partícula dependiendo de la aplicación del producto polimérico. Asimismo se emplean la calcita microcristalina, el caolín, el talco, sulfato de bario, sílice y silicatos.

Respecto a los pigmentos, el más importante de ellos es el dióxido de titanio (TiO_2), tipo anatasa y rutilo, tratados superficialmente. El dióxido de titanio aumenta la resistencia a la intemperie (geomembranas impermeabilizantes) y estabilidad al color (perfiles de ventanas). La pigmentación negra se consigue con negro de carbono del cual existen una gran variedad comercial dependiendo del tamaño de partícula (Catalina, 1997).

2.7.2.2. Retardantes de llama

El PVC es un material autoextinguible debido a la presencia de cloros en su estructura. A pesar de esto, para algunas aplicaciones se hace necesaria la adición de retardantes de llama como los complejos inorgánicos de magnesio/zinc o molibdeno/calcio/zinc. En las formulaciones de PVC para su procesado mediante calandrado se utilizan complejos de zinc/fosfato/molibdeno.

2.7.2.3. Lubricantes

Son otros aditivos importantes en el PVC rígido ya que sin ellos es prácticamente imposible su procesado. En el PVC plastificado su objetivo principal es impedir la adherencia de los compuestos de moldeo de las diversas partes del equipo. Los estearatos de calcio y ceras hidrocarbonadas son respectivamente, buenos lubricantes internos y externos. Los ésteres de ácidos grasos se utilizan como antiadherentes en filmes de PVC y copolímeros acrílicos y de estireno para PVC rígido o semirrígido.

2.7.2.4. Estabilizantes

Los estabilizantes constituyen un aditivo notable para el PVC debido a la gran inestabilidad del PVC frente a la degradación térmica y fotooxidativa. En su degradación, el PVC genera cloruro de hidrógeno que autocataliza la reacción de degradación en cadena dando lugar a radicales libres que pueden formar peróxidos, hidroperóxidos y secuencias poliénicas conjugadas en las cadenas moleculares. Como estos polienos conjugados son grupos cromóforos, en la degradación de una geomembrana de PVC-P aparecen coloraciones debido a este tipo de patología.

2.7.2.5. Estabilizantes térmicos

Los estabilizantes térmicos empleados en el PVC tienen un punto en común desde el punto de vista de su mecanismo de actuación y es su capacidad de reaccionar con el cloruro de hidrógeno generado en su degradación. Además muchos de ellos actúan bloqueando las posiciones reactivas de la macromolécula de PVC desde el punto de vista de iniciación de la degradación (Owen, 1984).

- **Sales metálicas.** Tradicionalmente las más utilizadas son las sales de bario, cadmio, zinc y plomo. Estas sales se usan combinando dos metales diferentes, Ba/Cd y Ca/Zn, lo que da lugar a un efecto sinérgico en la estabilización.
- **Compuestos organometálicos.** Son productos formados por bis-sales de alquil estaño y las tri-sales de monoalquil estaño. Los grupos alquilo más frecuentes son el butilo y los octilos, que confieren buenas prestaciones al polímero. En general esta familia de órgano-estánnicos es muy eficiente y no es necesario aportar grandes cantidades a la formulación del PVC. Estos compuestos actúan atrapando el cloruro de hidrógeno y descomponiendo hidroperóxidos.

Las nuevas exigencias medioambientales a nivel internacional exigen que los estabilizantes basados en metales pesados se sustituyan por otros sistemas libres de compuestos potencialmente tóxicos (Sanchez y Chirinos 2014).

La búsqueda de compuestos más “amigables” con el medioambiente y rentables, como estabilizantes de PVC, ha dado lugar al desarrollo de nuevos estabilizantes orgánicos basados en compuestos poliméricos y oligoméricos como uracilos, eugenol, antraquinona, hidroxibenciltioéteres, derivados de urea, fenilurea y feniltioureas.

Siguiendo la misma línea de investigación en nuevos estabilizantes con menor toxicidad, se han obtenido compuestos inorgánicos basados en complejos de magnesio-aluminio. Estos compuestos son conocidos como arcillas intercambiadoras de iones. Asimismo, han sido objeto de estudio las arcillas basadas en montmorillonita y los estabilizantes térmicos basados en productos naturales y biopolímeros como proteínas de soja y aceites de semilla de girasol y soja.

La efectividad de estos estabilizantes térmicos alternativos se basa en los mismos mecanismos de estabilización ya conocidos para el PVC: inhibir la formación de HCl,

interrumpir la formación de polienos conjugados y sustituir grupos lábiles en la cadena del polímero.

A pesar de las numerosas líneas de investigación en este campo durante la última década, la aplicación de estos estabilizantes a gran escala todavía es incipiente en comparación con los estabilizantes térmicos tradicionales (Sanchez y Chirinos 2014).

2.7.2.6. Estabilizantes ultravioleta

El PVC sufre un rápido proceso de fotodegradación causada por la radiación ultravioleta presente en la luz solar. Debido a esto se hace necesaria la incorporación de estabilizantes ultravioleta en las formulaciones para su uso en el exterior.

Los estabilizantes ultravioleta actúan fundamentalmente a través de dos mecanismos: absorbiendo la radiación ultravioleta y desactivando estados excitados de los grupos cromóforos responsables de la iniciación del proceso de degradación (Owen, 1984; Catalina y Arias, 1993).

Los estabilizantes ultravioleta de uso comercial son:

- **Pigmentos.** Actúan como absorbentes o apantallantes de la radiación UV. Los pigmentos de uso comercial más extendido son el negro de carbono o el dióxido de titanio (TiO_2).
- **Complejos metálicos de níquel.** Actúan desactivando estados excitados de grupos carbonilo y oxígeno singlete.
- **Orto-hidroxibenzofenonas y Orto-hidroxifenilbenzotriazoles.** Actúan como absorbentes UV y disipadores de energía.
- **Aminas impedidas estéricamente.** Las aminas impedidas estéricamente, conocidas por las siglas HALS (“Hindered Amines Light Stabilizers”) están consideradas como los mejores estabilizantes ultravioleta del mercado. Su mecanismo de estabilización se basa en la desactivación de estados excitados.

2.7.2.7. Plastificantes

Resulta un hecho paradójico que el PVC sea uno de los polímeros comerciales menos estables y al mismo tiempo uno de los materiales poliméricos más importantes, al menos en cuanto al número de toneladas de consumo. El éxito comercial se debe en gran parte al

descubrimiento de estabilizantes y aditivos que han hecho posible la formulación de composiciones termoplásticas de gran utilidad.

La síntesis del ftalato de bis(2-etilhexilo) en 1933 hizo que se produjera un auge importante en la fabricación del PVC plastificado. Desde ese momento y hasta nuestros días se han sintetizado numerosos compuestos como adipatos, fosfatos, trimelitados y compuestos epoxi que dan lugar a productos de PVC plastificado con características especiales (Graham 1973; Sears y Darby 1982).

El PVC se puede considerar un polímero único en cuanto a su compatibilidad con los plastificantes ya que su polaridad, su estructura helicoidal y su proporción de regiones amorfas y cristalinas dentro de la cadena molecular, hacen que sea compatible con un gran número de estructuras moleculares como la de los plastificantes (Figuras 2.13 y 2.14). Además, el PVC presenta una característica importante que es su capacidad para absorber grandes cantidades de plastificantes con objeto de modificar sus propiedades físicas (Nass y Heiberger 1986).

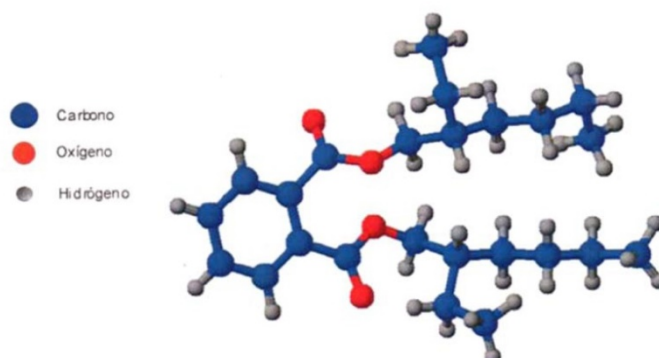


Figura 2.13. Representación tridimensional del ftalato de dioctilo.
(Fenollar 2011)

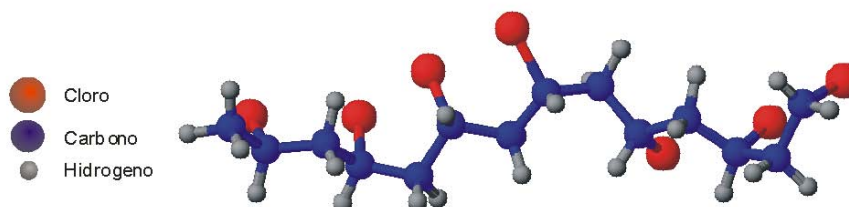


Figura 2.14. Representación tridimensional de la macromolécula de PVC.
(Fenollar 2011)

2.7.2.7.1. Teorías de la plastificación

La plastificación del PVC puede ser interna o externa. (Nass y Heiberger 1986; Wilson 1995). La plastificación interna se produce al interaccionar el polímero con el plastificante mediante enlaces covalentes lo que hace que la migración sea prácticamente nula. Los plastificantes poliméricos tienen un elevado precio y necesitan mayor aporte de energía para integrarlos en el material polimérico. Por ello se emplean solamente en los casos en los que la geomembrana polimérica requiera una elevada resistencia al estar en contacto con hidrocarburos, tales como aceites y grasas (Stark et al. 2005).

Investigaciones recientes en la plastificación interna del PVC han dado lugar a procedimientos para obtener un PVC plastificado con sales metálicas de ftalatos e isoftalatos que permiten su anclaje químico a las cadenas poliméricas. De esta forma se obtiene un material polimérico en el que el plastificante no puede migrar ni ser extraído (Navarro et al. 2010).

La plastificación del PVC en geomembranas más utilizada y económica es la externa. En este caso el plastificante se absorbe y adsorbe a través de los poros del polímero creando un volumen libre en el que las fuerzas de cohesión entre polímero-plastificante son más débiles, fundamentalmente fuerzas de van der Waals, lo que da lugar a un material más flexible.

El hecho de que el PVC rígido se transforme en un material flexible se debe a la variación de la temperatura de transición vítrea (T_g). La temperatura de transición vítrea del PVC sin aditivos está en el rango de los 80°C, al añadir el plastificante, que en el caso de las geomembranas el porcentaje suele estar comprendido entre 30-35%, la T_g disminuye hasta un valor cercano a -40°C. La temperatura de transición vítrea va disminuyendo a medida que aumenta la concentración de plastificante en el polímero (Kay et al. 2004).

Existen numerosas teorías acerca de la plastificación que han intentado explicar dicho fenómeno teniendo en cuenta las interacciones polímero-plastificante. Las dos primeras fueron desarrolladas casi simultáneamente por los mismos autores, por lo que en algunos aspectos son similares (Sears y Darby 1982; García 2006).

Teoría del gel. Esta teoría considera que los polímeros están formados por una red con estructura tridimensional que se mantiene unida por una serie de interacciones temporales establecidas en distintos puntos de la cadena molecular del polímero. La acción

del plastificante consiste en romper esos puntos de unión, dando lugar a la solvatación del polímero en esos puntos de la cadena macromolecular, con el consiguiente aumento de su flexibilidad.

Teoría de la lubricación. Según esta teoría, la función del plastificante es reducir la fricción intermolecular entre las moléculas del polímero facilitando su movimiento. Esta teoría no explica muchos aspectos generales de la plastificación.

Teoría del volumen libre. La teoría del volumen libre de Sears y Darby (1982) propone que entre las moléculas del polímero existe únicamente un volumen libre que permite la libertad de movimiento de las mismas. La adición de moléculas de plastificantes con cadenas flexibles hace que aumente ese volumen libre. El resultado es que disminuye la T_g , consiguiéndose una mayor flexibilidad en el PVC. Esta teoría está ampliamente difundida, sin embargo no explica aspectos básicos de la plastificación como, por ejemplo, porqué algunos compuestos son útiles como plastificantes y otros no, ni el hecho de que unos polímeros se plastifican con facilidad, mientras que otros no lo hacen.

Un enfoque empírico que explica de una forma más detallada la interacción polímero-plastificante es el **Modelo de Moorshead**. Este modelo describe que las fuerzas de atracción predominantes en el PVC son debidas a la interacción dipolo-dipolo de forma que los líquidos que posean una estructura dipolar similar serán compatibles con el PVC. Los dipolos más comunes en los plastificantes son los grupos éster de ácidos carboxílicos y los derivados epoxi.

La estructura de la molécula tiene un efecto importante en las propiedades polímero plastificado; mientras que los grupos polares son esenciales para lograr una buena compatibilidad, el resto de la molécula puede ser cíclica o alifática o una combinación de las dos estructuras. Los grupos polares del plastificante hacen que aumenten las características mecánicas del polímero plastificado pero la flexibilidad solo mejorará moderadamente ya que hay puntos de elevada cohesión en muchas zonas de las cadenas del polímero. Sin embargo si la molécula de plastificante contiene además grupos alifáticos no polares y no-polarizables, estos separarán los dipolos del polímero sin introducir nuevos puntos de interacción en la cadena macromolecular (Figura 2.15). De esta forma, las moléculas así plastificadas presentan una buena flexibilidad (Beltrán y Marcilla 2012).

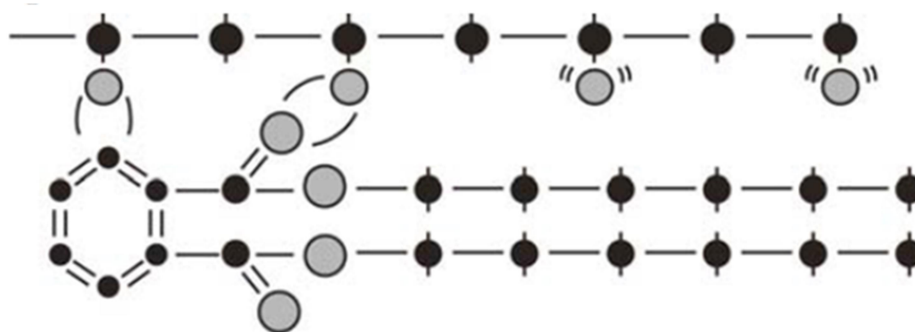


Figura 2.15. Interacción Polímero-Plastificante y efecto pantalla de la cadena alifática del plastificante (Beltrán y Marcilla 2012).

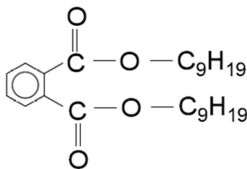
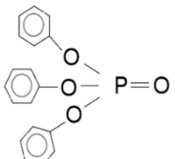
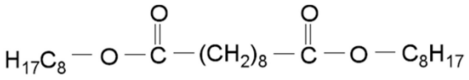
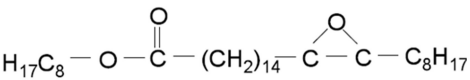
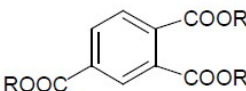
2.7.2.7.2. Tipos de plastificantes

La mayoría de los plastificantes comerciales son ftalatos, diésteres alifáticos, fosfatos y trimelitatos. Las estructuras químicas de estas familias de plastificantes figuran en la Tabla 2.11.

Los plastificantes más utilizados en el PVC son compuestos derivados de ftalatos. Los mencionados ftalatos son ésteres alquílicos o arílicos del ácido ftálico en los que las cadenas radicálicas que sustituyen a los protones de los dos grupos ácidos del ácido dicarboxílico presentan una gran variedad en cuanto a longitud y ramificación, en otras palabras, la estructura química de los ftalatos está formada por un anillo aromático con dos grupos éster formando cadenas cortas hidrocarbonadas (Diebel 2002). Ejemplos de estos compuestos son el ftalato de dioctilo (DOP), ftalato de diisodecilo (DIDP) y ftalato de diisononilo (DINP).

La compatibilidad de los ftalatos con el PVC está justificada por la similitud de los parámetros de solubilidad. El valor del parámetro de solubilidad del PVC es de $9.6 \text{ (cal/cm}^3\text{)}^{1/2}$ y el parámetro de solubilidad de los ftalatos oscilan entre $8.4 \text{ (cal/cm}^3\text{)}^{1/2}$ y $11.9 \text{ (cal/cm}^3\text{)}^{1/2}$ (Graham 1973).

Tabla 2.11. Familias de plastificantes más frecuentes (Beltrán y Marcilla 2012).

FAMILIA	PLASTIFICANTE	ESTRUCTURA
Ftalato	DINP Ftalato de diisononilo	
Fosfato	TFF Fosfato de trifenilo	
Adipato	DOA Adipato de diisooctilo	
Epoxi	Epoxiestearato de octilo	
Trimelitados	Ésteres del ácido trimetílico	

En el estudio llevado a cabo por el Área de Materiales del CEDEX en las geomembranas que impermeabilizan las balsas de almacenamiento de agua para riego, se han detectado un elevado número de ftalatos formando parte de la composición de las geomembranas de PVC (Blanco et al. 2008b, c, Crespo 2011, Noval 2015). El análisis cualitativo y cuantitativo de los ftalatos ha permitido conocer la presencia de estos plastificantes de forma individual o combinada. En la Tabla 2.12 se muestran los ftalatos detectados en las geomembranas estudiadas.

Tabla 2.12. Ftalatos encontrados en las geomembranas estudiadas en el CEDEX.
(Blanco et al. 2008b, c, Crespo 2011, Noval 2015)

ABREVIATURA	NOMBRE QUIMICO	FÓRMULA MOLECULAR
DIDP	Ftalato de diisodecilo	$C_6H_4[COO(CH_2)_7CH(CH_3)_2]_2$
DNOP	Ftalato de di-n-octilo	$C_6H_4[COO(CH_2)_7CH_3]_2$
DUP	Ftalato de diundecilo	$C_6H_4[COO(CH_2)_{10}CH_3]_2$
DEHP	Ftalato de bis(2-etilhexilo)	$C_6H_4[COOCH_2CH(C_2H_5)(CH_2)_3CH_3]_2$
DIDNP	Ftalato de isodecilnonilo	$CH_3(CH_2)_8OOC C_6H_4COO(CH_2)_7CH_2(CH_3)_2$
DIDUP	Ftalato de isodecilundecilo	$(CH_3)_2CH(CH_2)_7OOC C_6H_4COO(CH_2)_{10}CH_3$
BzBP	Ftalato de bencilbutilo	$CH_3(CH_2)_3OOC C_6H_4COOCH_2C_6H_5$
DOP	Ftalato de n-decil-n-octilo	$CH_3(CH_2)_7OOC C_6H_4COO(CH_2)_9CH_3$
DDP	Ftalato de di-n-decilo	$C_6H_4[COO(CH_2)_9CH_3]_2$

En la década de los setenta se comenzó a utilizar con gran profusión láminas de naturaleza macromolecular para la impermeabilización, tanto en edificación como en ingeniería civil. La primera utilizada tanto a nivel español como internacional fue la de caucho butilo(IIR), pero ante los problemas a que dieron lugar por el ataque electrófilo del ozono atmosférico a los dobles enlaces de la cadena polimérica, no tardaron en ser sustituidas por las de poli(cloruro de vinilo) plastificado.

Como la misión del plastificante es transformar el PVC rígido en flexible, inicialmente se utilizaron plastificantes de gran compatibilidad con la resina pero de bajo peso molecular,

que además eran más baratos. Por ello, el plastificante más utilizado era el ftalato de bis(2-etilhexilo) que a tal efecto se empleó en geomembranas para la impermeabilización de varios embalses tanto en la Comunidad Canaria como en la cuenca del Mediterráneo (Crespo 2011, Blanco et al. 2016b).

Asimismo, se empleó ftalato de bencilbutilo en la balsa de Barranco de Benijos (La Orotava). En este caso, los tres plastificantes detectados en la geomembrana de PVC-P fueron el ftalato de bis(2-etilhexilo), ftalato de diisodécilo y el mencionado ftalato de bencilbutilo. Se realizaron análisis a los cuatro años de su instalación y se repitieron de nuevo a los veinticuatro, observándose que en esas fechas el ftalato de bencilbutilo había desaparecido totalmente (Noval 2015).

En ocasiones se hizo uso de plastificantes con radicales alquilo de tipo lineal como ftalato de n-decilo, ftalato de n-decil-n-octilo y ftalato de n-octilo dando lugar a láminas con una durabilidad superior a las que se venían empleando (Crespo 2011). El empleo de plastificante de un peso molecular bastante superior a los anteriores como el ftalato de diisodécilo en el embalse de La Laguna de Barlovento marcó un hito a nivel internacional en la durabilidad de este tipo de geomembrana (Blanco et al. 2012b, 2016e)

Actualmente se tiende a emplear ftalatos de elevado peso molecular, con radicales alquilo de 9 o más átomos de carbono en su cadena alquílica, para evitar una rápida migración y así conservar el medio ambiente.

2.7.3. FABRICACION DE GEOMEMBRANAS

La formulación típica de una geomembrana de PVC-P empleada en impermeabilización suele estar compuesta por un 50-70% de poli(cloruro de vinilo), un 25-35% de plastificantes, un 1-2% de negro de carbono y un 2-5% del resto de aditivos entre los que se encuentran los estabilizantes, cargas, colorantes y aditivos para facilitar el procesado (Hsuan et al. 2008). Una geomembrana de poli(cloruro de vinilo) plastificado en la actualidad está formada por los componentes que se citan en la Tabla 2.13 (Blanco 2016).

Tabla 2.13. Formulación de una geomembrana de PVC-P.

COMPUESTO	CANTIDAD, %
PVC	50-70
Plastificantes	25-35
Otros Aditivos: Absorbentes de luz UV Negro de carbono Dióxido de titanio Cargas Carbonato cálcico Estabilizadores Estearato cálcico	2-5

Los procesos empleados para la fabricación de las geomembranas de PVC son en la mayoría de los casos el calandrado y en menor medida la extrusión.

El proceso de calandrado se inicia con el premezclado del polímero con los plastificantes, estabilizantes y cargas. Una vez realizada la mezcla de todos estos aditivos, sólidos y líquidos, se transporta a un mezclador y desde ahí a una extrusora a 220°C de temperatura. Una vez fundida la masa, se hace pasar a un laminador a 200°C para homogeneizarla.

La calandra que transformará la masa polimérica se compone de varios cilindros con diferentes temperaturas que oscilan desde los 198°C hasta 140°C. Durante este proceso se controla el espesor de la lámina de PVC.

Seguidamente, la lámina pasa por los cilindros de estiraje, de menor diámetro, y a los refrigerantes constituidos por cilindros con agua fría a 7°C. Por último, se procede al almacenamiento de la lámina, una vez enrollada y etiquetada (Brydson, 1995; Noval, 2015).

Si la geomembrana va reforzada con tejidos de hilos de poliéster, éste se debe insertar entre dos láminas de PVC de forma que, controlando la presión y temperatura, el refuerzo quede adherido perfectamente al material polimérico.

2.7.4. DURABILIDAD DE LAS GEOMEMBRANAS DE PVC-P

Las geomembranas de PVC-P experimentan tres mecanismos de degradación: pérdida de plastificantes, degradación térmica y fotodegradación (Blanco et al.2010, 2013a,b). Estos tres procesos tienen lugar simultáneamente o pueden darse por separado .

2.7.4.1. Pérdida de plastificantes

El contenido se determina a través de un proceso de extracción de una muestra de la geomembrana de PVC-P. Esta extracción de plastificantes se lleva a cabo empleando éter etílico (Blanco et al. 2009, 2016e). La estimación cuantitativa de la pérdida de plastificantes fue definida por Giroud (1995) según la Ecuación 2.1.:

Ecuación 2.1. Cálculo de la pérdida de plastificantes según Giroud

$$P_L = \frac{C_{Po} - C_P}{C_{Po} (1 - C_P)} \times 100$$

Siendo:

P_L : Pérdida de plastificantes

C_{Po} : Contenido inicial en plastificantes

C_P : Contenido final en plastificantes

Esta estimación realizada por Giroud se ha llevado a cabo considerando que el éter no solo extrae los plastificantes, sino que arrastra a todos los componentes orgánicos de bajo peso molecular, exceptuando las cargas inorgánicas y la propia macromolécula.

La pérdida de plastificantes en las geomembranas de PVC tiene lugar a través de tres mecanismos diferentes cuando están en contacto con el medio que la rodea: migración al aire, a líquidos o a sólidos con los que está en contacto directo. Stark et al. (2005) realiza una descripción amplia y detallada de estos tres procesos.

2.7.4.2. Migración del plastificante al aire

La pérdida por volatilidad o migración al aire de los plastificantes presentes en la geomembrana de PVC-P no se ve afectada por rotura de enlaces químicos entre la resina y el plastificante. Esta migración al aire tiene lugar mediante dos procesos de transferencia: en primer lugar se produce la difusión desde el interior de la geomembrana a la superficie y

en segundo lugar la evaporación del plastificante desde la superficie de la geomembrana al aire. La migración de plastificante en el transcurso de estos dos procesos se ve afectada por la velocidad de difusión y la presión de vapor de las moléculas del plastificante (Sears y Darby, 1982; Wilson, 1995).

La velocidad de difusión está relacionada con la estructura molecular del plastificante y la permeabilidad en la geomembrana. Se ha observado que una geomembrana con un elevado contenido de plastificante presenta una velocidad de difusión del mismo mayor que una geomembrana con menor contenido de plastificante. Esto es debido a que al migrar el plastificante al aire, las fuerzas de Van der Waals hacen que las moléculas del polímero tiendan a acercarse, lo que incrementa la tortuosidad en la geomembrana de PVC-P. Esto conduce a la disminución de la velocidad de difusión de los plastificantes que permanecen en la geomembrana.

Papakonstantinou y Papaspyrides (1994) determinaron experimentalmente que la relación entre la pérdida de plastificante debida a la difusión es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de exposición de la geomembrana. Esta relación indica que la velocidad de difusión disminuye a lo largo del tiempo debido al aumento de la tortuosidad en el polímero pudiendo llegar a interrumpirse por completo.

Respecto al segundo proceso de transferencia de plastificante al aire, la velocidad de evaporación, se ha determinado que es función de la presión de vapor del plastificante en la geomembrana.

Numerosos investigadores han propuesto que, incrementando el peso molecular del plastificante y/o disminuyendo las ramificaciones del plastificante, se puede reducir la pérdida por volatilización en la geomembrana de PVC-P (Stepek y Daoust 1983; Giroud 1984; Wilson 1995).

En la Tabla 2.14. se exponen una serie de plastificantes comúnmente utilizados junto con su peso molecular y los valores de la pérdida de plastificantes que experimentan mediante volatilización y mediante extracción por agua. Las condiciones en las que se ha determinado la pérdida por volatilización han sido durante 24 h a una temperatura de 87°C sobre carbón activo. La extracción con agua se ha realizado durante 24 h a la temperatura de 50 °C.

Los datos de la tabla muestran que la pérdida por volatilización es menor en aquellos plastificantes con mayor peso molecular. Esto corrobora las afirmaciones de Stark en el

sentido de que al aumentar el tamaño de las moléculas de plastificante disminuye su difusión en el seno de la geomembrana de PVC-P debido a que aumenta la tortuosidad en las moléculas del polímero.

Tabla 2.14. Propiedades de los plastificantes más comunes (Spetek y Daoust, 1983).

Grupo	Plastificantes	Peso molecular (g/mol)	Pérdida por volatilización (%)	Extracción por agua (%)
Ftalatos	Ftalato de bencilbutilo (BBzP)	312	7.7	0.09
	Ftalato de dimetoxietilo	282	16.7	1.72
	Ftalato de dibutilo (DBP)	278	44.0	0.25
	Ftalato de butilooctilo (BOP)	334	9.5	0.04
	Ftalato de butilisodecilo (BDP)	363	11.5	0.08
	Ftalato de diisooctilo (DIOP)	391	4.3	0.03
	Ftalato de dicaprilo (DCP)	391	4.6	0.08
	Ftalato de bis(2-etilhexilo) (DEHP)	390	4.5	0.01
	Ftalato de n-octil n-decilo (ODP)	418	3.5	0.03
	Ftalato de diisodecilo (DIDP)	446	1.8	0.02
Fosfatos	Fosfato de trifenilo	326	3.6	0.04
	Fosfato de cresildifenilo	337	1.0	0.03
	Fosfato de tricresilo (TCP)	368	1.13	0.02
	Fosfato 2-etilhexildifenilo	362	-	-
Ésteres de ácidos grasos	Adipato de diisobutilo (DIBA)	258	63.0	3.34
	Di-2-etilbutirato de tri(etilenglicol)	346	36.9	1.22
	Sebacato de dibutilo (DBS)	314	-	-
	Sebacato de dioctilo (DOS)	426	4.2	0.014
	Acetoxiestearato de butilo	398	5.4	0.55
Otros Plastificantes	Dibenzoato de dietilenglicol	314	5.5	0.28
	Diisobutirato de 2,2,4-trimetil-1,3-pentanodiol	286	23.7	2.83

2.7.4.3. Migración del plastificante a líquidos

Stark et al. (2005) proponen que la migración de los plastificantes a un líquido puede darse por dos mecanismos dependiendo del tamaño molecular del líquido extractor.

Si el tamaño molecular del líquido extractor es lo suficientemente pequeño para penetrar en la estructura macromolecular del PVC, se produce la extracción del plastificante. El mecanismo predominante en este proceso de extracción es que el líquido penetra en el PVC plastificado disolviendo los plastificantes, de forma que se difunden juntos hacia la superficie de la geomembrana (Nass y Heiberger, 1986). En este caso, los factores que controlan el proceso de migración son, la compatibilidad del líquido extractor, por una parte con el plastificante, y por otra, con el PVC.

En contraposición, si el tamaño molecular del líquido extractor es demasiado grande para penetrar en la estructura macromolecular del PVC, no tiene lugar la extracción del plastificante. En este caso, el líquido extractor disuelve el plastificante en la superficie de la lámina. Esto ocurre con aceites parafínicos y aceites lubricantes refinados como líquidos extractores, cuyas moléculas son demasiado grandes para penetrar el PVC (Messadi et al. 1981). En este caso, el coeficiente de difusión del plastificante es el factor que controla la retención del plastificante y la pérdida será función del peso molecular del mismo.

2.7.4.4. Migración del plastificante a un sólido

La migración de los plastificantes desde la geomembrana de PVC-P a otros materiales poliméricos no ha sido estudiada con tanta profundidad como la migración al aire o a líquidos.

Los plastificantes pueden migrar desde el PVC plastificado a otro material si no existe resistencia en la interfase de los dos materiales y si el plastificante es compatible con el material receptor (Nass y Heiberger 1986; Papakonstantinou y Papaspyrides 1994, Wilson 1995).

Varios autores han estudiado la migración de geomembranas de PVC plastificado a otro PVC no plastificado, teniendo en cuenta la relación entre la migración y el tiempo de exposición de la geomembrana.

Este fenómeno debe tenerse en cuenta, particularmente, en los sistemas de impermeabilización de vertederos, donde la geomembrana de PVC-P se encuentra en contacto con un geocompuesto de drenaje, en cuyo caso es posible esperar una migración desde la geomembrana al geocompuesto.

Wilson (1995) concluye que la estructura del plastificante juega un papel importante en la migración hacia otro material polimérico. También expone que incrementando el peso

molecular y la linealidad del plastificante se consigue reducir la migración del plastificante a un sólido.

Por otro lado, la migración del plastificante de una geomembrana de PVC-P a otro tipo de geomembrana ha podido observarse en algunas de las balsas o embalses en la isla de Tenerife. La balsa de San Antonio en La Matanza de Acentejo (Tenerife) se impermeabilizó con una geomembrana de PVC-P. En el momento de su instalación se colocó sobre ella, a lo largo del botaolas, otra geomembrana de alrededor de un metro de ancho con el fin de asegurarse la protección de la verdadera lámina impermeable para un futuro caso de reimpermeabilización. Al cabo de los ocho años y medio de la instalación se comprobó que la lámina protegida no solamente no había perdido plastificantes sino que había incrementado su contenido como consecuencia de la migración de la lámina del babero a la lámina impermeabilizante como se puede comprobar en la Tabla 2.15.(Blanco et al. 2006).

**Tabla 2.15. Contenido en plastificantes inicial y a los 8.5 años
(Blanco et al. 2006).**

MUESTRAS	CONTENIDO EN PLASTIFICANTES, %
Original	30.8
Talud	
Norte	32.3
Sur	32.3
Este	32,6
Oeste	33.0

La balsa de Buen Paso, en Icod de los Vinos (Tenerife) se impermeabilizó inicialmente con una geomembrana de PVC-P reforzada con un tejido de hilos sintéticos. Cuando finalizó su vida útil se procedió a una reimpermeabilización con una geomembrana de PEAD. Se ha comprobado que los plastificantes que aun estaban en la geomembrana de PVC-P pasaron a la lámina de PEAD contribuyendo a su deterioro, fundamentalmente, debido a procesos de “stress cracking” (Blanco et al. 2016c).

2.7.5. FACTORES QUE CONTROLAN LA RETENCIÓN DEL PLASTIFICANTE

Los factores que controlan la retención de los plastificantes pueden ser extrínsecos o intrínsecos.

Los factores extrínsecos son la temperatura, compuestos químicos, microorganismos y las características del entorno con el que está en contacto, tales como el aire, líquido u otro sólido (Nass y Heiberger 1986; Giroud y Tisinger 1993; Wilson 1995).

Los factores intrínsecos que controlan la retención de los plastificantes están relacionados con las propiedades moleculares del plastificante (Wilson, 1995): peso molecular, su linealidad y su polaridad.

Debido a que la mayoría de los plastificantes utilizados en el PVC son polares, solamente se tendrá en cuenta el peso molecular del plastificante y la linealidad del radical que sustituye a los hidrógenos del ácido carboxílico, para explicar la retención del mismo en las geomembranas de PVC.

2.7.5.1. Peso molecular del plastificante

La movilidad del plastificante es uno de los principales factores que influyen en su difusión hacia el exterior del polímero, hecho que está relacionado con su peso molecular, su volatilidad y su difusión. A mayor peso molecular del plastificante menor migración del mismo. Sin embargo, un peso molecular elevado también reduce la compatibilidad y eficiencia del proceso de plastificación. Incrementando el peso molecular se incrementa la retención debido a que se impide la difusión del plastificante en la estructura molecular de la geomembrana. Por otra parte, esto plantea un inconveniente en el procesado de las geomembranas; por ello es necesario llegar a una situación de compromiso entre el aumento de la retención del plastificante en el polímero y el procesado de la geomembrana de PVC. (Stark et al., 2005).

En la Figura 2.16. se representa la relación entre el peso molecular de los plastificantes expuestos en la Tabla 2.14 y su pérdida por volatilidad al aire. Aunque los datos presentan cierta dispersión, se observa que la migración por volatilidad decrece con el aumento del peso molecular. Cuando el peso molecular es superior a 400 g/mol, la pérdida de plastificantes debida a la volatilización es menos de un 2% cuando el ensayo se realiza a 87°C durante 24 h.

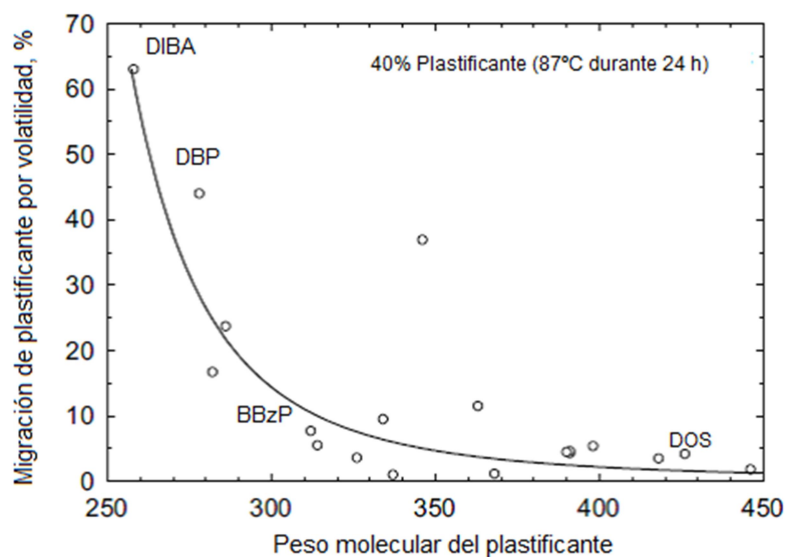


Figura 2.16. Relación entre el peso molecular del plastificante y su pérdida por volatilización (Stark et al. 2005).

En la Figura 2.17 se representa la relación entre el peso molecular de los plastificantes definidos en la Tabla 2.14 frente a la extracción por agua. La dependencia de la migración al agua no es significativa, en este caso, en comparación con los procesos de migración al aire o a un sólido ya que, como se ha descrito anteriormente, este tipo de migración depende de la naturaleza del medio líquido. Se observa como la migración es menor que el 1% para pesos moleculares de plastificantes superiores a 300 g/mol.

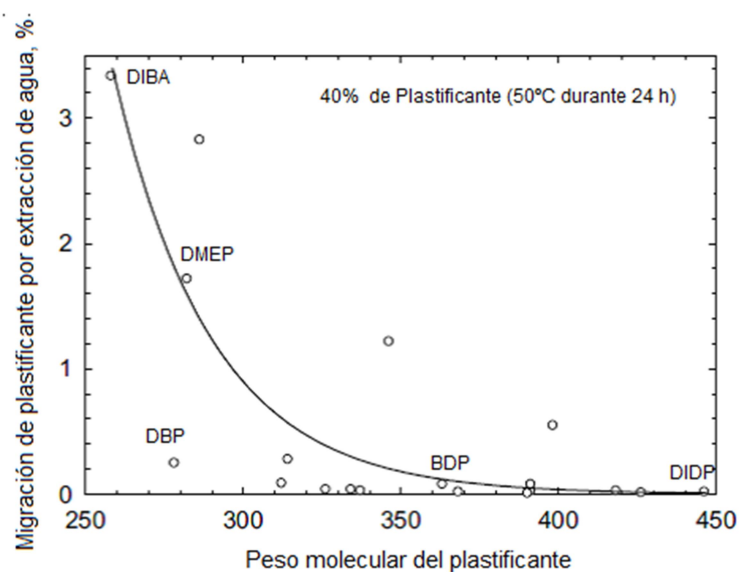


Figura 2.17. Relación entre el peso molecular del plastificante y su pérdida por extracción por agua. (Stark et al. 2005)

Por último, en la Figura 2.18 se representa la relación entre el peso molecular del plastificante y la migración a una espuma flexible de poliuretano. La velocidad de migración se determinó durante 24 horas a 70 °C, siendo el contenido inicial de plastificantes del 50 ppc (partes por cien). En la Figura 2.18 se puede ver cómo a medida que aumenta el peso molecular del plastificante, decrece la migración al sólido. Para pesos moleculares superiores a los 400 g/mol, la velocidad de migración hacia la espuma de poliuretano es inferior a 0.1 g/cm².

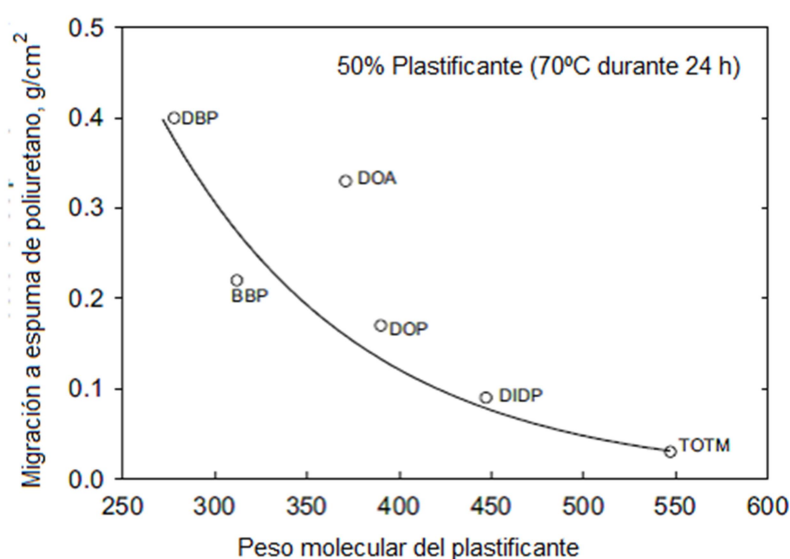


Figura 2.18. Relación entre el peso molecular del plastificante y su migración a una espuma de poliuretano (Stark et al. 2005).

Stark et al. (2005) concluyen que el incremento del peso molecular provoca una disminución de la presión de vapor, y de la misma forma disminuye la migración potencial del plastificante hacia el aire, hacia un líquido o hacia un sólido. Por lo tanto, estos autores recomiendan un peso molecular medio superior a 400 g/mol para asegurar el buen comportamiento de la geomembrana de PVC-P durante su vida en servicio.

El “PVC Geomembrane Institute” (2004) en su especificación PGI-1104 menciona la misma recomendación respecto al peso molecular del plastificante utilizado en las geomembranas de PVC-P. Un peso molecular igual o superior a 400 g/mol asegura la máxima retención del plastificante y proporciona una larga durabilidad de la geomembrana. El “Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas” editado por el Gobierno de España hace la misma recomendación (MARM 2010).

2.7.5.2. Linealidad del plastificante

La linealidad o ramificación de un plastificante suele determinarse por el “índice de ramificación”, que se expresa como el porcentaje de átomos de carbono contenidos en el extremo de la cadena (Wilson 1995); de forma que a mayor índice de ramificación, menor es la linealidad del plastificante.

Giroud y Tisinger (1993) mostraron que los ftalatos lineales no migraban tan fácilmente como los ramificados. Sin embargo, esta afirmación sólo es cierta si se considera la pérdida debida al proceso de volatilización (Wilson 1995). Anteriormente se habían realizado estudios en plastificantes con diferentes niveles de linealidad, observando que los ftalatos lineales eran menos volátiles y por tanto, mejores para las aplicaciones en las que la geomembrana de PVC-P se encontraba expuesta (Orem y Sears, 1979; Krauskopf 1993, Crespo 2011).

El comportamiento de la migración del plastificante hacia un líquido o hacia un sólido, muestra que los plastificantes ramificados experimentan menos pérdida que los plastificantes lineales. En la Figura 2.18 se muestra que el DOP y el DOA tienen pesos moleculares similares, 390 y 371, respectivamente. Sin embargo, la migración de DOA es aproximadamente dos veces la del DOP debido a que el DOA es un plastificante lineal y el DOP ramificado.

Finalmente, se puede concluir que un mayor índice de ramificación de un plastificante conduce a un incremento de la presión de vapor, lo que hace que se incremente la pérdida del plastificante por volatilización. Sin embargo, la ventaja de los plastificantes ramificados es que presentan una lenta migración hacia un líquido o hacia un sólido Stark et al. (2005).

2.7.6. DEGRADACION TÉRMICA

La degradación térmica del PVC da lugar, entre 100-200°C al proceso de deshidrocloración con la formación de secuencias de polienos conjugados en la cadena del polímero (Castillo, 1986). La mayor parte de los estudios llevados a cabo sobre la degradación del PVC tratan fundamentalmente de la naturaleza, número y estabilidad relativa de los puntos o sitios por donde se inicia la deshidrocloración, de los factores que influyen en el crecimiento de dobles enlaces, así como, del mecanismo de degradación.

Starnes (2002) ha realizado una revisión de las líneas de investigación encaminadas a determinar los puntos de inicio en la degradación térmica del PVC. Del estudio realizado se deduce que hay una gran diversidad autores que defienden diferentes alternativas: existencia de cloros alílicos, presencia de átomos de cloro en carbonos terciarios, inicio a través de estructuras carbonílicas en la cadena del polímero y por último, la iniciación relacionada con la estereoespecificidad del PVC.

De acuerdo con esta última alternativa, estudios cinéticos realizados mediante sustitución nucleófila de PVC con distintos reactivos mostraron que la estereoespecificidad del PVC es la responsable de la degradación térmica del polímero (Millán et al. 1991, 1996).

A pesar de las divergencias en la iniciación de la degradación térmica del PVC un hecho que está demostrado, es que tanto en ausencia como en presencia de oxígeno, la degradación térmica se produce mediante reacciones en cadena de tipo radical, las cuales general nuevos puntos reactivos dando lugar a la autoaceleración de proceso y la pérdida de HCl. En la Figura 2.19 se muestra la estructura química del poli(cloruro de vinilo) y la formación de dobles enlaces debido a la reacción de deshidrocloración.

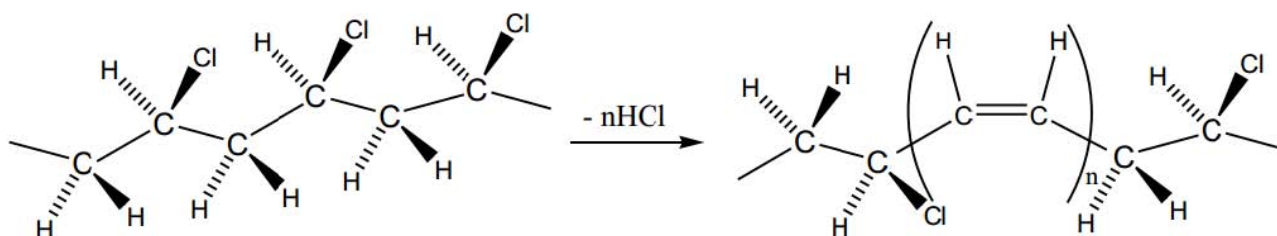


Figura. 2.19. Deshidrocloración del poli(cloruro de vinilo).

2.7.7. DEGRADACION ULTRAVIOLETA

El PVC es un polímero particularmente sensible a la radiación ultravioleta (longitud de onda 312 nm) procedente de la luz solar (Figura 2.20).

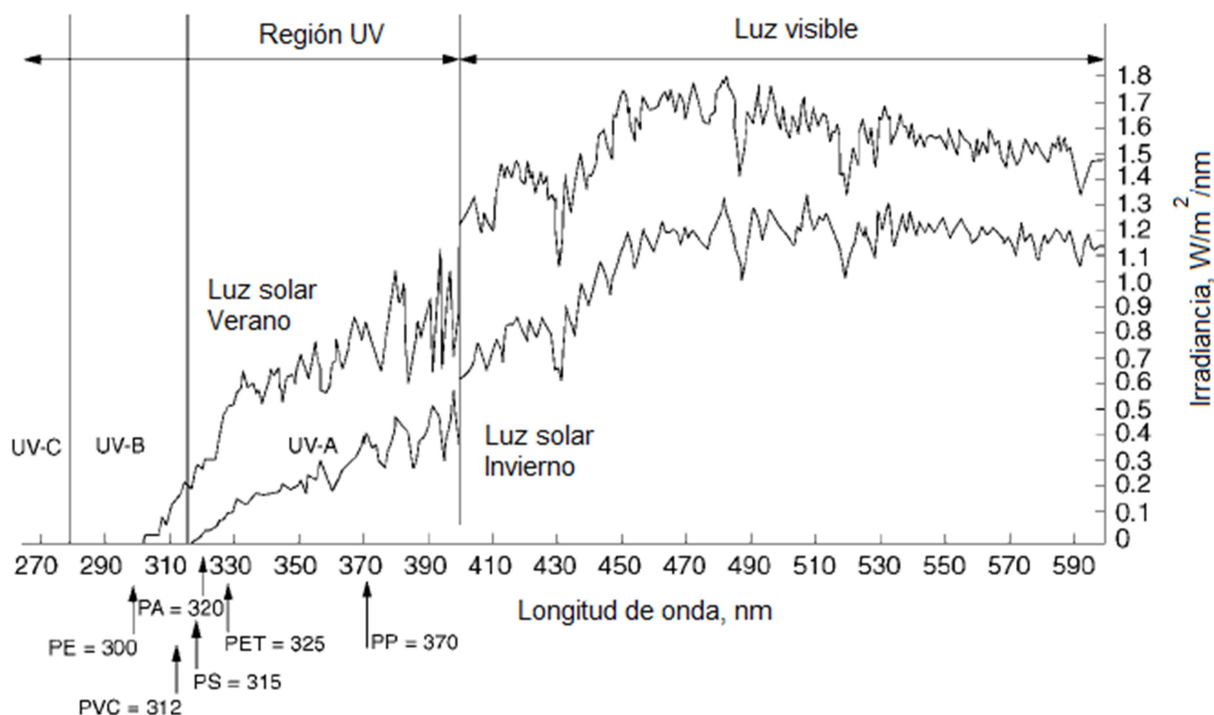


Figura 2.20. Espectro visible y UV de la radiación solar.

La degradación UV, tanto en atmósfera inerte como en presencia de oxígeno, comienza mediante reacciones vía radicales libres dando lugar a la deshidrocloración y la formación de polienos conjugados. Asimismo, se ha podido demostrar que la fotodegradación en atmósfera inerte conduce a reacciones de entrecruzamiento en las cadenas del PVC. La degradación en presencia de oxígeno pone de manifiesto que se produce deshidrocloración a una velocidad superior a la observada en atmósfera inerte y que aumentan los compuestos oxidados que son los responsables de la escisión de las cadenas (Decker y Balandier 1982).

La velocidad de degradación del polímero mediante fotooxidación está influenciada por otras variables, como la permeabilidad al oxígeno, la temperatura y humedad.

Todos estos factores hacen necesaria la presencia de los estabilizantes ultravioleta en las geomembranas de PVC-P con objeto de mantener su durabilidad a lo largo del tiempo.

2.8. BIBLIOGRAFIA

AENOR (2013) UNE EN 13361, *Barreras geosintéticas. Requisitos para su utilización en la construcción de embalses y presas*.

AENOR (2015) UNE EN ISO 10318, *Geosintéticos. Términos y definiciones*.

Aguiar, E., Blanco, M., Vara, T., Soriano, J. y Armendáriz, V. (2010). *Una década de experiencia en el comportamiento de una geomembrana de poliolefina elastomérica*. Proc. 3er Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación, Obra Civil y Balsas y 3er Simposio Nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas, pp. 721-730. Barcelona, octubre.

Arranz, F. (1985) *Ciencia y Tecnología de los Materiales Plásticos*. Ed. Focitec

ASTM D1693, (2016). *Test Method for Environmental Stress-Cracking of Ethylene Plastics*.

ASTM D5397 (2012) *Standard Test Method for Evaluation of Stress Crack Resistance of Polyolefin Geomembranes Using Notched Constant Tensile Load Test*

Baba, M., Gardette, J. L. y Lacoste, J. (1999). *Crosslinking on ageing of elastomers: I. Photoageing of EPDM monitored by gel, swelling and DSC measurements*. Polymer degradation and stability, **63**, 121-126.

Beltrán, M. y Marcilla, A. (2012). *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades*. Ed. Universidad de Alicante.

Blanco, M. (2005). *Geomembranas I*. Proc. I Simposio Nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización. Sevilla, noviembre-diciembre.

Blanco, M. (2012) *Spanish experience in the use of synthetic geomembranes for hydraulic works*. Keynote Lecture, in Blanco et al. (Eds.) Eurogeo5, Ed. R. B. Servicios Editoriales, S. L., 7-23 (electronic proceedings) Vol. 1: XXI-XXXIX (printed volumes). Valencia, septiembre,

Blanco, M. (2015). *Las geomembranas sintéticas poliméricas en la impermeabilización de balsas en el Reino de Marruecos*. Ingeniería. Civil, **179**, 63-73.

Blanco, M. (2016). *Geomembranas*. Jornada sobre geosintéticos en obras hidráulicas y medio ambiente. Santa Cruz de La Palma, noviembre.

Blanco, M.; Aguiar, E.; Cea, J. C. de; Castillo, F. y Soriano, J. (2008a). *Estado de las geomembranas sintéticas de polietileno de alta densidad (PEAD) a los siete años de su instalación en balsas*. Ingeniería Civil, **151**, 49-60.

Blanco, M.; Aguiar, E.; García, F.; Vara, T.; Soriano, J. y Castillo, F. (2011). *État de la barrière géosynthétique polymérique en EPDM de la retenue d'El Golfo dans l'île d'El Hierro (Îles Canaries)*. Proc. 8^{èmes} Rencontres Géosynthétiques pp. 283-293. Tours (Francia), marzo.

Blanco, M.; Aguiar, E.; Rico, G.; Pargada, L.; Crespo, M.A. y Solera, R.-(2008c). *Estudio de los plastificantes utilizados en geomembranas de PVC-P procedentes de la isla de La Palma*. Proc. 2º Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación y Obra Pública y 2º Congreso Internacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas. pp. 461-469 Palma de Mallorca

Blanco, M.; Castillo, F. y Aguiar, E. (2006). *Comportamiento de los plastificantes utilizados como aditivos del poli(cloruro de vinilo) plastificado usado como geomembrana en obras hidráulicas*. Revista de Plásticos Modernos **92** (603), 246-250.

Blanco, M., Castillo, F., Noval, A. M., Aguiar, E., Vara, T. Amat, B., Touze-Foltz, N. y Farcas, F. (2016d). *Long term behavior and life expectancy of EPDM geomembranes installed in water reservoirs*. Eurogeo6. 403-416. Ljubljana, septiembre.

Blanco, M., Castillo, F., Touze-Foltz, N., Amat, B. y Aguiar, E. (2014b). *Behaviour of EPDM geomembrane 18 years after its installation in a water reservoir*. 10th International Conference on Geosynthetics. ISBN: 978-3-9813953-9-6. Berlín.

Blanco, M., Castillo, F., Touze-Foltz, N., Amat, B. y Aguiar, E. (2014a). *Behaviour of an EPDM geomembrane 18 years after its installation in a water reservoir*. International Journal of Geomate Vol. 9, nº 1, Serie 17, 1348-1352.

Blanco, M., Crespo, M. A., Leiro, A. y Mateo, B. (2013c) *Relación entre la durabilidad de geomembranas de PVC-P y el tipo de plastificante utilizado como aditivo*. Proc. XII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad de la Construcción CONPAT-Colombia, P 583-592. Cartagena de Indias, septiembre-octubre.

Blanco, M., Crespo, M. A., Noval, A. M., Leiro, A., Mateo, B., Aguiar, E., Vara, T. y Giroud, J.P. (2013b) *La durabilidad de geomembranas de PVC-P en función del aditivo utilizado como plastificante*. Proc. Congreso Geosintec Iberia 1, 138-146. Sevilla, noviembre.

Blanco, M., García, F., Soriano, J., Castillo, F., Aguiar, E. y Vara, T. (2012a). *État de la retenue d'El Golfo dans l'île d'El Hierro (Îles Canaries)*. Sciences, Eaux et Territoires, **8**, 14-17.

Blanco, M., Leiro, A., Soriano, J., Crespo, M. A., Zornberg, J. G., Aguiar, E., Rico, G. y Pargada, L. (2012b) *Long-term performance of the "Laguna de Barlovento" reservoir waterproofing using a PVC-P geomembrane*, in Blanco et al. (Eds.) Eurogeo5, Ed. R. B. Servicios Editoriales, S. L.: Vol. 2: 55-63 (electronic proceedings) Vol. 1: 265-273 (printed volumes). Valencia, septiembre.

Blanco, M., Mateo, B., Leiro, A., Aguiar, E., Vara, T., Abad, P y Zornberg, J. (2016c) *Performance over time of the re-waterproofing HDPE geomembrane installed above the PVC-P geomembrane in Buen Paso reservoir*. Eurogeo6. Ljubljana, septiembre

Blanco, M., Mateo, B., Redón, M., Torregrosa, J. B., Sánchez, F.J., Aguiar, E., Vara, T., Touze-Foltz, N. y Farcas, F. (2016a). *Performance of geomembranes seldom used in hydraulic works, installed in the experimental field of El Saltadero*. Eurogeo6, pp. 417-426. Ljubljana, septiembre.

Blanco, M., Noval, A. M., Crespo, M. A., Cazzuffi, D., Giroud, J. P., Aguiar, E. y Vara, T. (2016e). *Evolution over time of PVC-P geomembrane used at Barlovento Reservoir*. Eurogeo6. 631-641. Ljubljana, septiembre

Blanco, M.; Rico, G.; Pargada, L.; Aguiar, E. y Castillo, F. (2009). *Determinación de los ftalatos utilizados como aditivos en la geomembrana de la balsa de La Florida mediante cromatografía de gases-espectrometría de masas*. Ingeniería Civil, **154**, 87-95.

Blanco, M.; Rico, G.; Pargada, L.; Aguiar, E.; Castillo, F. y Crespo, M.A. (2010) *Influencia del tipo de plastificante en la durabilidad de las geomembranas de PVC-P*. Proc. 3^{er} Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación, Obra Civil y Balsas y 3^{er} Simposio Nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas, pp. 347-357. Barcelona, octubre.

Blanco, M.; Rico, G.; Pargada, L.; Castillo, F. y Aguiar, E. (2008b) *Estudio de plastificantes utilizados en geomembranas de PVC-P empleadas en impermeabilización de obras hidráulicas*. Revista de Plásticos Modernos **96** (629), 386-391.

Blanco, M., Solera, R., Giroud, J. P., Pérez Sánchez, M., Redón Santafé, M., Sánchez Romero, F. J., Torregrosa Soler, J. B. y Zapata Raboso, F. A. (2016b). *Characteristics of six PVC-P geomembranes installed in reservoirs in Spanish Mediterranean Basin*. Eurogeo6. 600-608. Ljubljana, septiembre.

Blanco, M., Touze-Foltz, N., Amat, B., Castillo, F. y Aguiar, E. (2013a). *Comportement d'une géomembrane EPDM 18 ans après son installation dans la retenue d'El Boquerón (Tenerife, España)* Proc. 9^{èmes} Rencontres Géosynthétiques pp. 405-413. Dijon (Francia), abril.

Brydson, J.A. (1995) *Plastics Materials*. Ed. Butterworth-Heinemann Ltd. Sixth Edition.

Castillo, F (1986). *Estudio de la influencia de la tacticidad en la fotodegradación del poli(cloruro de vinilo)*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

Castillo, F. y Blanco, M. (1991). *Síntesis, caracterización y fotodegradación en atmósfera inerte de diferentes tipos de poli(cloruro de vinilo)*. Pub. CEDEX. Monografía M-20. Ed. Neografis. Madrid.

Catalina, F. (1997). *Aditivos para el PVC*. Revista de Plásticos Modernos, vol. 73, nº 492, 570-579.

Catalina, F y Arias, B. (1993). Fotoestabilizantes UV en polímeros. Revista de plásticos modernos, **440**, 137-148.

Champetier, G. y Monnerie, L. (1973). *Introducción a la Química Macromolecular*. Ed. Espasa-Calpe. Madrid.

Crespo, M. A. (2011). *Comportamiento de barreras geosintéticas poliméricas (GBR-P) a base de poli(cloruro de vinilo) plastificado de distinta formulación, instaladas en embalses*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

Crespo M. A. (2016). *Waterproofing geomembranes liofe expectancy: effect of a pigmented coating*. Eurogeo6. 391-402. Ljubljana, septiembre.

Decker, C. y Balandier, M. (1982). *Degradation of poli(vinyl chloride) by U.V. radiation—I. Kinetics and quantum yields*. Eur. Polym. J., **18**, 1085-1091.

Delor-Jestin, F., Lacostea, J., Barrois-Oudinb, N., Cardinetc, C., Lemairea, J. (2000). *Photo-Thermal and natural ageing of ethylene-propylene-diene monomer (EPDM) rubber used in automotive applications. Influence of carbon black, crosslinking and stabilizing agents*. Polymer Degradation and Stability **67**, 469-477.

Diebel, P. W. (2002). The effect of formulation on the physical properties and durability of flexible PVC geomembranes. Proc. of 7th International Conference on Geosynthetics. 28-34. Nice.

Duek, E. R., Juliano, V. F., Guzzo, M., Kascheres, C. y De Paoli, M. A. (1990). *The photo-oxidation of EPDM rubber: Part II—The photo-initiation process*. Polymer degradation and stability, **28**, 235-248.

Fatou, J.(1985) *Ciencia y Tecnología de los Materiales Plásticos*. Ed. Focitec.

Fenollar, O. A. (2011). *Utilización de plastificantes naturales para la obtención de PVC flexible de bajo impacto medioambiental*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Firestone (2013) *Geomembrane: General Technical Guide for Water Reservoirs*. F. B. Products.

García, S. (2006). *Migración de Plastificantes de PVC. Tesis doctoral*. Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería Química. <http://hdl.handle.net/10045/11221>.

Giroud, J. P. y Tisinger, L. G. (1993). *The influence of plasticizers on the performance of PVC geomembranes*. Proc. of Geosynthetic Liner Systems: Innovation, Concerns and Design, IFAI, Roseville, Minn, 169-196.

Giroud, J. P. (1984). *Aging of PVC geomembranes in uranium mine tailing ponds*. In Proc. of International Conference of Geomembranes (Vol. 2, pp. 311-316), Denver, CO, USA, June.

Giroud, J. P. (1995). *Evaluation of PVC geomembrane shrinkage due to plasticizer loss*. Geosynthetics International, **2**(6), 1099-1113.

- Giroud, J. P. y Touze-Foltz, N. (2003). *Geomembranes for Landfills*. Geosynthetics International. Vol. 10, N° 4: 124-133.
- Graham, P. R. (1973). *Phthalate ester plasticizers-why and how they are used*. Environmental Health Perspectives, January; 3: 3-12.
- Grassie, N. y Scott, G. (1985). *Polymer degradation and stabilization*, New York.
- Hsuan, Y. G. (2000). *Data base of fields incidents used to establish HDPE geomembrane stress cracking resistance specification*. Geotextiles and geomembranes. Vol. 18, 1-22.
- Hsuan, Y.G., Schroeder, H.F., Rowe, R. K., Muller, W., Greenwood, J., Cazzuffi, D. y Koerner, R.M. (2008). *Long-term performance and lifetime prediction of geosynthetics*. Keynote paper, Proc. of EuroGeo 4-4th European Geosynthetics Conference, September.
- Hsuan, Y. G. y Koerner, R. M. (1995). *Long term durability of HDPE geomembrane: Part I—Depletion of antioxidant*. GRI Report, 16, 35.
- Hsuan, Y. G. y Koerner, R. M. (1998). *Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene geomembranes*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, **124**, 532-541.
- Kay, D., Blond, E. y Mlynarek, J. (2004). *Geosynthetics durability: a polymer chemistry issue*. Proc. of GéoQuebec-57th Canadian Geotechnical Conference, October
- Koerner, R. M. (2005). *Designing with geosynthetics*, Pearson Prentice Hall. 5th Edition.
- Krauskopf, L. G. (1993). *Plasticizer structure/performance relationships*. Journal of vinyl Technology, **15**, 140-147.
- Lustiger, A. (1985). *The molecular mechanism of slow crack growth in polyethylene*. Dissertation Abstracts International Part B: Science and Engineering, 46(6), Drexel University.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2010). *Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas*. Ed. Comité Nacional Español de Grandes Presas.
- Messadi, D., Vergnaud, J. M. y Hivert, M. (1981). *A new approach to the study of plasticizer migration from PVC into methanol*. Journal of Applied Polymer Science, **26** (2), 667-677.

- Millán, J. y Martínez, G. (1985). *Ciencia y Tecnología de los Materiales Plásticos*. Ed. Focitec.
- Millán, J., Martínez, G., Jimeno, M. L., Tiemblo, P., Mijangos, C., y Gómez-Elvira, J. M. (1991). *Configurational and conformational effects in the thermal degradation of poly (vinyl chloride)*. Makromolekulare Chemie. Macromolecular Symposia, **48**, 403-417.
- Millán, J. y Martínez, G. (1997). *Degradación y estabilización del poli(cloruro de vinilo)*. Revista de Plásticos Modernos, vol. 73, nº 492, 570-579.
- Millán, J.L., Martínez, G., Gómez-Elvira, J.M., Guarrotxena, N., Tiemblo, P. (1996) *Influence of tacticity on the thermal degradation of PVC: 8. A comprehensive study of the local isotactic GTTG- conformation dependence of the mechanism of initiation*. Polymer **37**, 219-230.
- Nass, L. I. y Heiberger, C. A. (1986). *Encyclopedia of PVC: Vol. 1. Resin Manufacture and Properties*, Marcel Dekker, pp. 702.
- Navarro, R., Pérez, Gómez Tardajos, M., y Helmut Reinecke, (2010). *Ftalate plasticizers covalently Bound to PVC: plasticization with suppressed migration*. Macromolecules, **43**, 2377-2381.
- Noval, A. M. (2015). *Estudio del comportamiento de tres geomembranas de EPDM, PVC-P y PEAD a lo largo del tiempo*. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III, Madrid.
- Noval, A. M., Blanco, M., Farcas, F., Aguiar, E., Castillo, F. y Touze-Foltz, N. (2014a). *Long-term performance of EPDM geomembrane in El Boquerón reservoir*. Geosynthetics International, 21 (6) 387-398.
- Noval, A. M., Blanco, M., Farcas, F. y Touze-Foltz, N (2014b). *End of life of HDPE geomembranas used to waterproofing reservoirs*. Geomembrane workshop Berlin-2: Developing a protocol to determine the remaining service life of installed exposed HDPE geomembranes, Berlín, septiembre.
- Noval, A. M., Blanco, M., Farcas, F. y Touze-Foltz, N. (2015). *Etude de la durabilité de la geomembrane en EPDM installée dans la retenue d'eau 'El Boquerón'*. Proc. 1⁰èmes Rencontres Géosyntétiques pp. 399-408. La Rochelle (Francia), marzo.

Orem, J. H. y Sears, J. K. (1979). Flexible poly (vinyl chloride) for long outdoor life. *Journal of Vinyl Technology*, **1**, 79-83.

Owen, E. D. (1984). *Degradation and Stabilisation of PVC*. Applied Science, London.

Papakonstantinou, V. y Papaspyrides, C. D. (1994). *Plasticizer migration from plasticized into unplasticized poly (vinyl chloride)*. *Journal of Vinyl Technology*, **16**, 192-196.

Peggs, I. D. y Carlson, D. S. (1989). *Stress cracking of polyethylene geomembrane: field experience, Durability and Aging of Geosynthetics*, Elsevier Applied Science Publishers Ltd., Amsterdam, Netherlands, pp.195–211.

Pons, C. (2012). *Durabilité des géomembranes en polyéthylène haute densité utilisées dans les installations de stockage de déchets non dangereux*. Thèse doctorale, Université Paris-Est.

PVC Geomembrane Institute (PGI) (2004). *PVC Geomembrane Material Specification 1104*. University of Illinois, Urbana, IL, www.pvcgeomembrane.com, 1 January 2004.

Rowe, R. K. y Sangam, H. P. (2002). *Durability of HDPE geomembranes*. *Geotextiles and Geomembranes*, **20**, 77-95.

Rowe, R. K., Hsuan, Y. G., Lake, C. B., Sangam, P., y Usher, S. (1998). *Evaluation of a composite (geomembrane/clay) liner for a lagoon after 14 years of use*. In Proc. 6th International Conference on Geosynthetics. Atlanta, 191-196.

Rubín de Célix, M. (2005). *Balsas de residuos industriales*. I Simposio Nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas. Vol 1.- Sevilla, octubre-noviembre.

Sánchez, N. y Chirinos, J. (2014). *Estabilizantes térmicos alternativos para el PVC*. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, **15**, 178-197.

Sears, J. K. y Darby, J. R. (1982). *The Technology of Plasticizers*. John Wiley y Sons, Nueva York, pp. 1116.

Stark, T. D., Choi, H. y Diebel, P. W. (2005). *Influence of plasticizer molecular weight on plasticizer retention in PVC geomembranes*. *Geosynthetics International*, **12**, 99-110.

Starnes, W. H. (2002). *Structural and mechanistic aspects of the thermal degradation of poly(vinylchloride)*. *Prog. Polymer Science*, **27**, 2133-2170.

Stepek, J. y Daoust, H. (1983). *Additives for Plastics*. New York: Springer Verlag.

Touze-Foltz, N. (2009). *Outstanding issues regarding the Use of Geosynthetics in Landfills*. Proc. III Seminário Português sobre geossintéticos. Coimbra.

Touze-Foltz, N. (2012). *Performance of geosynthetics for environmental protection in Landfills*. Keynote Lecture, in Blanco et al. (Eds.) Eurogeo5, Ed. R. B. Servicios Editoriales, S. L.: Vol. 1: XLVII-LXVII., Valencia, septiembre.

Vale, J. L., González, A., Ortega, G., Monar, E., Scuero, A., Vaschetti G. y Lilliu, G. (2015). *Estado del arte de la impermeabilización de presas con geomembranas. La solución de Camporredondo*. Geosintec 2. Madrid, octubre

Wilson, A. S. (1995). *Plasticizers: principles and practice*. The Institute of Materials.

Zornberg, J. G. (2010) *Utilización de geosintéticos en vertederos*. Conferencia sobre geosintéticos. IGS y CEDEX, Madrid.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

CAPITULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. NORMATIVA ESPAÑOLA Y EUROPEA

El estudio experimental que se desarrolla en esta memoria se inició en el año 2000. (Aguiar, E. y Blanco, M. 2000; Blanco et al. 2000, 2009a). Debido a que la normativa ha ido cambiando a lo largo del tiempo, se ha considerado interesante indicar las normas utilizadas en los primeros momentos de este estudio así como las últimas, publicadas en años recientes.

En el año 2000 la normativa vigente estaba constituida por las normas UNE 104300:2000EX “Plásticos. Láminas de polietileno de alta densidad, PEAD, para la impermeabilización en obra civil. Características y métodos de ensayo” (AENOR 2000a) y UNE 104303:2000EX “Materiales sintéticos. Láminas de poli(cloruro de vinilo) plastificado, PVC-P, con o sin armadura, no resistentes al betún, para la impermeabilización de embalses, depósitos, piscinas, presas y canales para agua. Características y métodos de ensayo” (AENOR 2000b).

Posteriormente, en el año 2004, se publicó la norma EN 13361 siendo adoptada por nuestro país en el año 2005 y publicada con el título: UNE EN 13361 “Barreras geosintéticas. Requisitos para su utilización en la construcción de embalses y presas” (AENOR 2013a). En esta norma se especifica además de las características de las barreras geosintéticas poliméricas, las relacionadas con las barreras bentoníticas y bituminosas utilizadas en la construcción de embalses y presas.

La publicación de la norma europea tuvo su origen años atrás cuando en 1985 en Berlín se convocó la primera reunión relacionada con el campo de impermeabilización con geomembranas. En la actualidad es el Comité Técnico 254, que lleva por nombre “Flexible Sheets for Waterproofing” el encargado de la elaboración de las normas europeas.

La norma EN 13361 no hace referencia a especificaciones sino a una serie de ensayos que deben realizarse, siendo el fabricante el que debe proporcionar los datos correspondientes para poder hacer el marcado CE en sus geomembranas. El marcado CE significa libre comercio en los distintos países de la Unión Europea, pero no implica marca de calidad.

Esta norma europea no determina ninguna exigencia respecto a los valores mínimos que deben cumplir las geomembranas. Teniendo en cuenta esto y la gran variedad de materiales poliméricos utilizados como geomembranas, el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino elaboró en 2010 el “Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas” en el que cita las recomendaciones y especificaciones mínimas para geomembranas homogéneas y reforzadas con tejido de hilos sintéticos.

El grupo de trabajo del Área de Materiales del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, ha llevado a cabo una serie de pruebas en colaboración con distintos estamentos oficiales para estudiar de una forma más amplia el comportamiento de los materiales poliméricos empleados en impermeabilización (Blanco et al. 1996, 2002; Soriano et al. 2005). Estas pruebas permitieron desarrollar una metodología experimental que hoy forma parte del cuerpo normativo nacional. (AENOR, 2011).

A continuación se relacionan las normas empleadas para la determinación de las características de las dos geomembranas de PVC-P.

Normativa Vigente Europea

UNE-EN 495-5, *Láminas flexibles para impermeabilización. Determinación de la plegabilidad a baja temperatura. Parte 5: Láminas plásticas y de caucho para la impermeabilización de cubiertas* (AENOR 2013b).

UNE EN 1849-2, *Láminas flexibles para la impermeabilización. Determinación del espesor y de la masa por unidad de superficie. Parte 2: Láminas plásticas y de caucho* (AENOR 2010).

UNE EN 13361, *Barreras geosintéticas. Requisitos para su utilización en la construcción de embalses y presas* (AENOR 2013a).

UNE EN ISO 291, *Plásticos. Atmósferas normalizadas para acondicionamiento y ensayos* (AENOR 2008a).

UNE EN ISO 527-1, *Plásticos. Determinación de las propiedades de tracción. Parte 1: Principios generales* (AENOR 2012)

UNE EN ISO 527-3, *Plásticos. Determinación de las propiedades de tracción. Parte 3: Condiciones de ensayo para películas y hojas* (AENOR 1996).

UNE EN ISO 527-4, *Plásticos. Determinación de las propiedades de tracción. Parte 4: Condiciones de ensayo para plásticos compuestos isotrópicos y ortotrópicos reforzados con fibras* (AENOR 1997).

Normativa Vigente Española

UNE 104304, *Materiales sintéticos. Puesta en obra. Determinación de la resistencia de la soldadura por pelado entre láminas sintéticas instaladas utilizadas en impermeabilización* (AENOR 2015).

UNE 104306, *Materiales sintéticos. Determinación del contenido en plastificantes en láminas de poli(cloruro de vinilo) plastificado, PVC-P, utilizadas en impermeabilización* (AENOR 2000c).

UNE 104317, *Impermeabilización. Determinación del recorrido del punzón antes de la perforación en geomembranas sintéticas impermeabilizantes instaladas en balsas* (AENOR 2011).

UNE 104423, *Materiales sintéticos. Puesta en obra. Sistemas de impermeabilización de embalses para riego o reserva de agua con geomembranas impermeabilizantes formadas por láminas de poli(cloruro de vinilo) plastificado (PVC-P) no resistentes al betún* (AENOR 1995).

UNE 104426, *Impermeabilización. Puesta en obra. Construcción de balsas cubiertas impermeabilizadas con geomembranas sintéticas* (AENOR 2008b).

Normativa empleada anterior al año 2005

UNE 104300EX, *Plásticos. Láminas de polietileno de alta densidad, PEAD, para la impermeabilización en obra civil. Características y métodos de ensayo* (AENOR 2000a).

UNE 104302EX, *Plásticos. Láminas de poli(cloruro de vinilo) plastificado, para la impermeabilización de cubiertas de edificios. Características y métodos de ensayo* (AENOR 2000d).

UNE 104303EX, *Materiales sintéticos. Láminas de poli(cloruro de vinilo) plastificado, PVC-P, con o sin armadura, no resistentes al betún, para la impermeabilización de embalses, depósitos, piscinas, presas y canales para agua. Características y métodos de ensayo* (AENOR 2000b)

3.2. TOMA DE MUESTRAS EN LA Balsa DE EL SALTADERO Y EL CAMPO EXPERIMENTAL

En esta memoria se contempla el estudio de las geomembranas de PVC-P instaladas, tanto en la balsa de El Saltadero como en el campo experimental (ICOLD 2010, Aguiar et al. 2012).

Las muestras estudiadas a lo largo de los dieciséis años de la instalación de la geomembrana de PVC-P en la balsa se extrajeron en función de la orientación y de la profundidad. Respecto a la orientación, se extrajeron muestras de la zona norte y sur, principalmente. En cuanto a la profundidad, se tomaron muestras de la zona de coronación, intermedia y del fondo de la balsa.

Las muestras extraídas en las zonas intermedia y fondo de la balsa de El Saltadero han sido menos numerosas debido a la dificultad que conlleva su obtención. La posibilidad de tomar muestras de la zona intermedia de la balsa depende del nivel de llenado de la misma mientras que, para la extracción de las muestras del fondo o próximas al fondo, la balsa debe estar totalmente vacía. Todas las muestras de la balsa de El Saltadero y del campo experimental fueron extraídas con una periodicidad anual en el seguimiento realizado a lo largo de los dieciséis años de instalación de la geomembrana de PVC-P (Blanco et al. 2012).

Las características a determinar en las dos geomembranas se eligieron con el criterio de obtener la mayor información posible acerca de su estado y a su vez, producir el menor daño posible al sistema de impermeabilización. Debido a esto la dimensión de la muestra extraída en cada inspección de seguimiento ha sido del orden de 40 cm x 30 cm. La zona de soldadura entre dos paños de geomembrana también se extrae en la misma muestra ya que

la determinación de la resistencia a la soldadura está íntimamente relacionada con la instalación de las láminas. (Blanco, M. y Aguiar, E. 1993; Amigó, E. y Aguiar, E. 1994; Blanco et al. 2000, 2005).

Las pruebas llevadas a cabo en los seguimientos periódicos en las muestras de PVC-P se mencionan a continuación:

- Espesor de la geomembrana
- Doblado a bajas temperaturas
- Resistencia al impacto dinámico
- Contenido en plastificantes
- Resistencia a la tracción y alargamiento
- Resistencia al impacto estático
- Resistencia de la soldadura por tracción y pelado
- Estudio de las muestras mediante microscopía óptica y electrónica

Además de estos ensayos, se han empleado otras técnicas instrumentales con objeto de completar el estudio de la composición de la geomembrana de PVC-P. Estas técnicas, que se describirán más adelante son la espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), la cromatografía de gases y la espectrometría de masas (CG-EM) (Ortega, J.J., y Blanco, M. 1982, 1985; Blanco et al. 2009b).

3.3. CARACTERISTICAS FISICO-QUÍMICAS

3.3.1. ESPESOR

La medida del espesor se llevó a cabo con un micrómetro de la marca MITUTOYO ELECONT modelo EA-3 (Figura 3.1) y el procedimiento de ensayo es el indicado en la norma UNE-EN 1849-2 (AENOR 2010).

El espesor de las geomembranas se determina realizando 10 mediciones sobre una probeta de 100 mm x100 mm. Las medidas deben efectuarse, al menos, a 5 mm de los bordes de la probeta y deben estar distribuidas uniformemente con objeto de que los valores obtenidos sean representativos del espesor medio de la geomembrana. Al extraer la probeta de la muestra de geomembrana, los bordes de la misma se ven afectados por los utensilios de

corte lo que puede dar lugar a una deformación del material en estos puntos. El resultado final, expresado en mm, es la media aritmética de los valores obtenidos.



Figura 3.1. Microscopio Mitutoyo

3.3.2. DOBLADO A BAJAS TEMPERATURAS

El doblado a bajas temperaturas se llevó a cabo en una cámara climática de la marca HERAEUS VÖTSCH HC 7020.

Este ensayo tiene por objeto determinar el comportamiento al plegado de las geomembranas después de estar sometidas a bajas temperaturas. El procedimiento consiste en flexionar las probetas sobre sí mismas un ángulo de 180° , después de estar sometidas durante 5 h a la temperatura correspondiente. Se ensayan dos probetas de dimensiones 100 mm x 100 mm y se realiza una flexión por cada una de las caras de las probetas. El ensayo se considera aceptable cuando no se produce la aparición de grietas ni roturas en el lugar de la flexión.

La temperatura de doblado depende del material polimérico que constituye la geomembrana y es una prueba que determina la calidad del material. La información que se obtiene de la prueba de doblado a bajas temperaturas constituye un hecho relevante debido a que, cuando aparecen las primeras grietas o roturas se puede pensar que la geomembrana ha comenzado su proceso de degradación, que en algunos casos puede ser bastante rápido.

En la Tabla 3.1 se muestran las diferentes temperaturas a las que se realiza este ensayo, según las recomendaciones del “Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas” (MARM 2010)

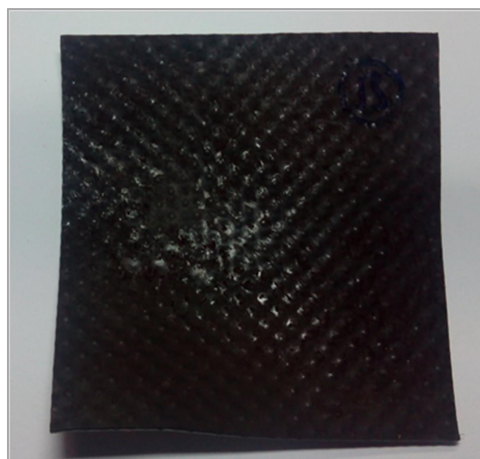
Tabla 3.1. Temperaturas del ensayo de doblado a bajas temperaturas en diferentes geomembranas

MATERIAL POLIMÉRICO	TEMPERATURA, °C
Polietileno de alta densidad (PEAD) Polietileno de media densidad (PEMD) Polietileno de baja densidad (PEBD) Polietileno de muy baja densidad (PEMBD) Polipropileno (PP)	-75
Caucho de etileno-propileno-dieno (EPDM)	-55
Caucho butilo (IIR) Polietileno clorosulfonado (CSM)	-40
Poli(cloruro de vinilo) plastificado (PVC-P) Copolímeros de etileno-acetato de vinilo (EVA/C)	-20

En las Figuras 3.2 y 3.3 se presentan, respectivamente, dos probetas extraídas de la zona intermedia del embalse en sus caras externa e interna después de la prueba de doblado a bajas temperaturas.



**Figura 3.2. Probeta de la zona intermedia de la balsa El Saltadero.
Cara externa.**



**Figura 3.3. Probeta de la zona intermedia de balsa El Saltadero.
Cara interna.**

3.3.3. RESISTENCIA AL IMPACTO DINÁMICO

El equipo empleado para determinar el impacto dinámico está formado por un percutor normalizado de acero de 500 g de peso con un extremo en forma de semiesfera con 12,7 mm de diámetro, un tubo guía graduado en milímetros, por el que se desliza de forma concéntrica el percutor y todo esto unido a un soporte de acero sobre el que se sitúan las probetas a ensayar (Figura 3.4).

El ensayo consiste en lanzar el percutor sobre una probeta de 100 mm x 100 mm que está situada a su vez sobre una plancha de aluminio de 3 mm de espesor y situada en el soporte del equipo. La altura desde la que se lanza el percutor varía en función del material polimérico, así si el ensayo se realiza en las probetas de materiales termoestables, como el EPDM, la altura es 300 mm. En cambio, si se lleva a cabo sobre termoplásticos como PEAD y PVC-P, la altura corresponde a 500 mm.

La prueba se considera superada si no se observa ninguna perforación en las zonas de impacto, hecho que se comprueba al realizar una prueba de estanquidad.

El ensayo de estanquidad consiste en situar la cara de la probeta sometida al impacto bajo una columna de agua destilada teñida con violeta cristal, de 1000 mm de altura, durante 24 horas a 23°C. Bajo la cara inferior de la probeta se coloca un papel de filtro seco de forma que, si el ensayo se ha superado, no se observe coloración alguna (Figura 3.5).



Figura 3.4. Equipo de resistencia al impacto

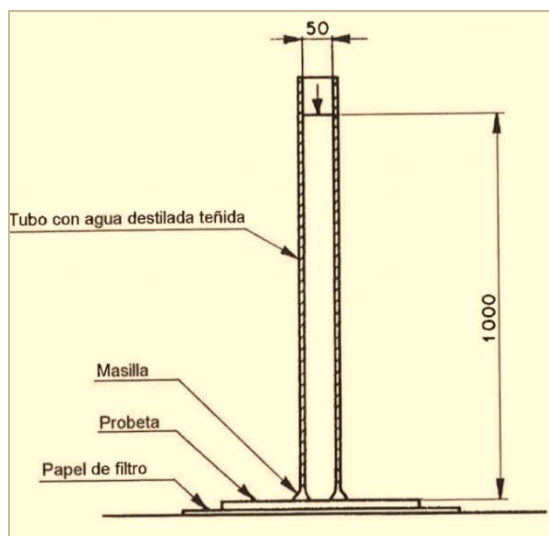


Figura 3.5. Prueba de estanquidad sobre la probeta ensayada

3.3.4. CONTENIDO EN PLASTIFICANTES

La determinación del contenido en plastificantes de la geomembrana de PVC-P se llevó a cabo con un equipo de extracción automática SOXTEC AVANTI 2050, de la firma FOSS TECATOR (Figura 3.6), de acuerdo a la norma UNE 104306 (AENOR 2000c).

Para la realización del ensayo de contenido en plastificantes se pesa una cantidad de GMB comprendida entre 1,00 g y 1,50 g, cortada en porciones de 1mm x 1mm aproximadamente, se introduce en cartuchos de celulosa, los cuales se sitúan en los 6 extractores soxhlet que forman el equipo. A continuación, los vasos en los que se recogen los plastificantes se taran y se sitúan en cada uno de los extractores, de forma que al conectar el equipo, todo el sistema queda herméticamente cerrado. Seguidamente se vierten 70 ml de éter etílico estabilizado con 6 ppm de BHT (2,6-Ditercbutil-4-metilfenol) mediante un dispensador con una boquilla lo suficientemente pequeña para introducir el reactivo en cada uno de los extractores. Una vez realizado esto, se conectan las unidades electrónicas que controlan el equipo, comenzando así el proceso de extracción.

La refrigeración de los extractores se lleva a cabo mediante un baño termostático en circuito cerrado, con una temperatura de agua de 10°C. Una vez finalizado el proceso de extracción y evaporación del reactivo, se retiran los vasos en los que se encuentran los plastificantes para depositarlos, durante 24 horas, en un desecador. Finalmente se pesan los vasos y se

calcula el porcentaje de plastificantes extraído, dado que se conoce el peso inicial de la muestra.

El ensayo se realiza por duplicado, para cada muestra, y el resultado se expresa como la media aritmética de los valores obtenidos.

Este proceso automático tiene varias ventajas frente al método tradicional. Una de ellas es el tiempo de ensayo, ya que se reduce considerablemente desde las 6 h, según el método de extracción tradicional, a 2 horas, según la extracción automática.



Figura 3.6. Equipo de extracción automática Soxtec Avanti 2050 de la firma FOSS TECATOR.

3.4. CARACTERÍSTICAS MECANICAS

Las características mecánicas estudiadas en este trabajo son las determinadas mediante ensayos de tracción y compresión. Dentro del grupo de ensayos de tracción se encuentran la resistencia a la tracción, alargamiento en la carga máxima y resistencia de la soldadura. El grupo de ensayos de compresión lo constituyen la resistencia al impacto estático o perforación y el valor del recorrido del punzón antes de perforar la geomembrana.

Las características mecánicas se ven afectadas por la temperatura y la velocidad a la que se realiza el ensayo. A temperaturas elevadas el material polimérico experimenta una disminución en la resistencia a la tracción y un aumento en el alargamiento. De la misma forma, cuando la velocidad de deformación es lenta, las moléculas pueden sufrir cambios de conformación u orientación en la dirección del esfuerzo aplicado, lo que conduce a una mayor tenacidad y alargamiento a la rotura que a velocidades altas (Beltrán, M. y Marcilla, A. 2012). Por todo esto, las probetas extraídas de las geomembranas deben estar acondicionadas a una temperatura y humedad normalizadas. La atmósfera de acondicionamiento para todas las probetas ensayadas fue $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura y $50\pm 10\%$ de humedad relativa, de acuerdo con la norma UNE EN ISO 291 (AENOR 2008a).

3.4.1. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y ALARGAMIENTO

Las características mecánicas se determinaron según las normas UNE EN ISO 527-1 (AENOR 2012), UNE EN ISO 527-3 (AENOR 1996) y UNE EN ISO 527-4 (AENOR 1997a). Los equipos empleados fueron las máquinas universales de la firma INSTRON modelo 1195 y modelo 4501 (Figuras 3.7 y 3.8). Las mordazas neumáticas empleadas para realizar todos los ensayos de tracción tienen una capacidad de carga de 10 KN.

La geometría de las probetas varía en función del tipo de geomembrana, ya sea homogénea, reforzada con fibra de vidrio o con tejido de hilos de poliéster. En las láminas homogéneas y reforzadas con fibra de vidrio las probetas son de tipo halterio mientras que en el caso de láminas reforzadas con tejido de hilos de poliéster, las probetas son rectangulares. Esta diferencia en la geometría se debe a que las probetas de tipo halterio, al tener líneas curvas, no son adecuadas para determinar la resistencia a la tracción en las láminas reforzadas con un tejido interno en forma de trama y urdimbre ya que se distorsionaría el resultado del ensayo (Figuras 3.9 y 3.10).

La determinación de la resistencia a la tracción se realiza en cinco probetas correspondientes al sentido longitudinal de la geomembrana y cinco en sentido transversal. En el caso de la geomembrana de PVC-P estudiada, las probetas mecanizadas son rectangulares con unas dimensiones de 150 mm x 50 mm. La velocidad de tracción es de 100 mm/min siendo la distancia de mordazas de 100 mm. El valor de resistencia a la tracción se calcula, en cada sentido, como promedio de las cinco probetas ensayadas.

En las geomembranas reforzadas con tejido de hilos de poliéster, el valor de carga y alargamiento máximo corresponde al tejido de hilos de poliéster, que actúa como refuerzo en la geomembrana de PVC-P. En cambio, el material polimérico continua deformándose hasta la rotura, de forma que alcanza valores de mayor alargamiento y menor carga.

La resistencia a la tracción se calcula según la Ecuación 3.1:

Ecuación 3.1. Resistencia en la carga máxima

$$\sigma = \frac{F}{b}$$

siendo:

σ , la resistencia en la carga máxima expresada en N/50 mm

F, la carga máxima en N

b, anchura de la probeta en mm

El alargamiento en la carga máxima se determina simultáneamente con el de resistencia a la tracción y su cálculo se efectúa mediante la Ecuación 3.2:

Ecuación 3.2. Alargamiento en la carga máxima

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \times 100$$

siendo:

ε , el valor de alargamiento en la carga máxima expresado en porcentaje.

L_0 , es la longitud de referencia de la probeta (distancia entre las mordazas) expresada en mm.

ΔL_0 , es el incremento de la longitud de la probeta entre las marcas de referencia (distancia entre las mordazas) expresado en mm.

En la Figura 3.11 se muestra el ensayo realizado en una probeta de geomembrana de PVC-P de la balsa de El Saltadero con geometría rectangular y en la Figura 3.12 un detalle de la rotura de la misma en la que se aprecian los hilos del tejido de refuerzo.



Figura 3.7. Máquina universal de la compañía INSTRON mod.1195.



Figura 3.8. Máquina universal de la compañía INSTRON mod.5569



Figura 3.9. Probeta Halterio



Figura 3.10. Probeta rectangular



Figura 3.11. Ensayo de tracción en probetas con geometría rectangular. Mordazas neumáticas de 10KN.

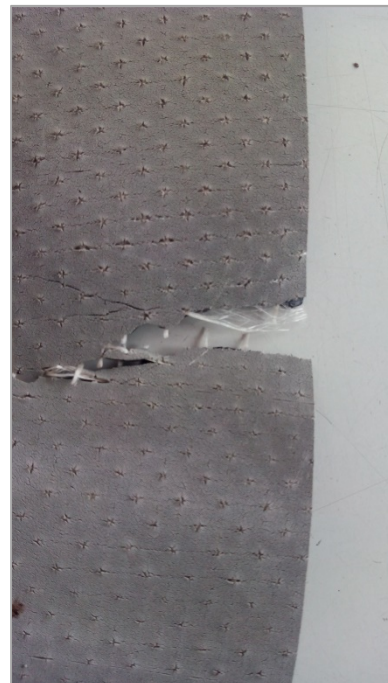


Figura 3.12. Detalle de la rotura en la probeta de PVC-P reforzado con tejido.

3.4.2. RESISTENCIA AL IMPACTO ESTÁTICO

La norma empleada para determinar la resistencia al impacto estático es la norma UNE 104317 “Impermeabilización. Determinación del recorrido del punzón antes de la perforación en geomembranas sintéticas impermeabilizantes instaladas en balsas”. (AENOR 2011a). El método descrito ha sido desarrollado en el Área de Materiales del CEDEX y posteriormente editado como Norma Española por la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) (Blanco et al. 1996).

Para la realización de este ensayo se utilizan diez probetas circulares de 50 mm de diámetro, de forma que se ensayan cinco por la cara externa de la probeta (cara expuesta a la intemperie) y cinco por la cara interna (cara en contacto con el terreno). La velocidad de desplazamiento de la cruceta en sentido de compresión es de 5 mm/min. El accesorio para determinar la perforación está formado por una mordaza con un dispositivo de membrana con vástago perforante cilíndrico con forma de pirámide irregular con sus aristas formando un ángulo de 90° y redondeadas a un radio de 0,5 mm. Esta geometría trata de simular la que muestran las piedras y áridos de aristas vivas que se encuentran en el terreno que forma la balsa (Figura 3.13).

La mordaza está compuesta por dos coronas circulares, con un cilindro vaciado interiormente de 30mm de diámetro, de forma que la probeta queda sujeta entre ellas. La mordaza está provista con un dispositivo de alineación del vástago cilíndrico para que la perforación se realice en el centro de la superficie libre de la probeta.

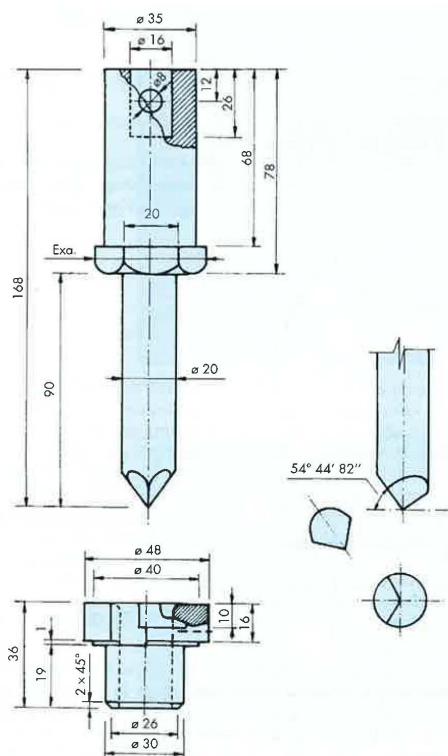


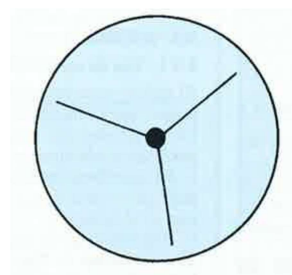
Figura 3.13. Vástago cilíndrico perforante y dispositivo de alineación (Blanco et al. 1996)

Durante el ensayo de perforación y de forma simultánea, se obtiene el valor del recorrido efectuado por el vástago cilíndrico desde el contacto con la probeta hasta el instante en el que tiene lugar la perforación.

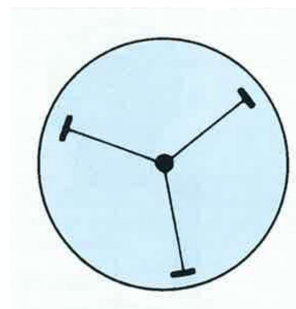
La carga de perforación y el recorrido experimentado antes del punzonamiento se obtienen como media aritmética de los resultados de las probetas de ensayo, expresándose en N y mm, respectivamente.

Con objeto de obtener unos valores comparables e independientes del espesor de la geomembrana, se determinó la resistencia a la perforación como el cociente entre la carga de perforación y el espesor medio de la geomembrana. La resistencia a la perforación se expresa en N/mm.

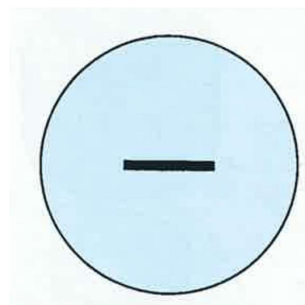
Es importante destacar que al aplicar esta metodología se pudo comprobar que la perforación se produce de diferente forma dependiendo de la naturaleza del material polimérico que constituye la geomembrana. El resultado de las múltiples pruebas realizadas en el Área de Materiales del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX dio lugar a una clasificación en la forma de rotura. En la Figura 3.14 se muestra de forma esquemática la geometría que presenta la perforación en geomembranas con distinto material polimérico (Blanco et al. 1996).



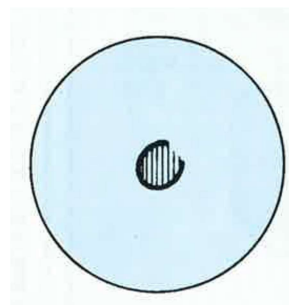
PEAD



PVC-P reforzado con tejido de
hilos sintéticos



PP



EPDM

Figura 3.14. Tipos de rotura observados en el ensayo de perforación.

En la Figura 3.15 se muestra el accesorio empleado para el ensayo de resistencia al impacto estático. En la Figura 3.16 se muestra una probeta circular extraída de la muestra de geomembrana que impermeabiliza la balsa de El Saltadero a los catorce años de su

instalación. En la fotografía se observan las marcas originadas por el punzón en el PVC-P reforzado con tejido de hilos de poliéster.

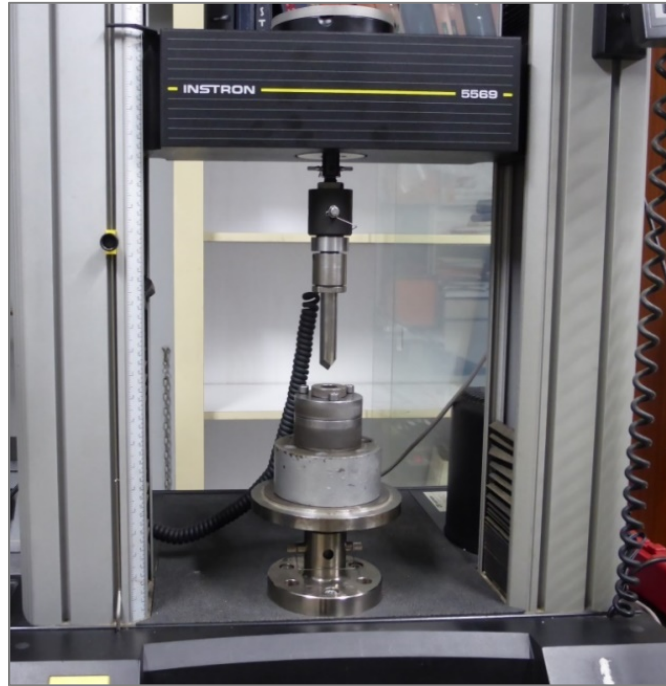


Figura 3.15. Accesorio para determinar la resistencia a la perforación.



Cara externa.



Cara interna.

Figura 3.16. Probeta perforada. Muestra de la balsa de El Saltadero extraída a los 14 años de instalación de la geomembrana.

3.4.3. RESISTENCIA DE LA SOLDADURA

La determinación de la resistencia de la soldadura se realiza mediante el procedimiento de tracción y de pelado, de acuerdo con las normas UNE EN ISO 527-3 (AENOR 1996) y UNE 104304 (AENOR 2015).

Las dimensiones de las probetas para el ensayo de resistencia de la soldadura por tracción son 200 mm x 50 mm de forma que la soldadura queda situada en el centro de la probeta y perpendicular a la dimensión más larga de la misma. La distancia entre las mordazas en este ensayo es mayor que en los anteriores descritos ya que debe existir una distancia libre de 50 mm a ambos lados de la soldadura (Figura 3.17). La velocidad de desplazamiento es de 100 mm/min realizándose el ensayo hasta la rotura. Se registra la carga máxima en Newton.

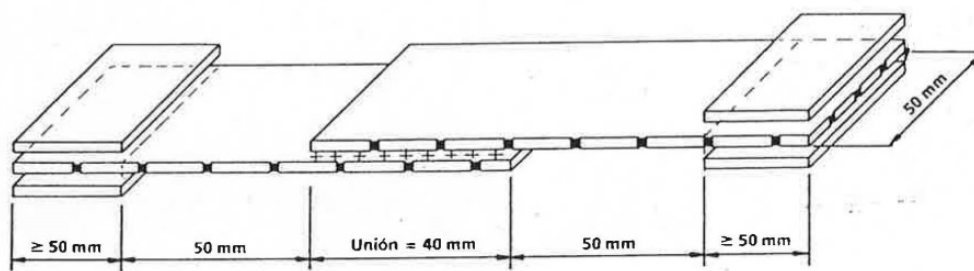


Figura 3.17. Probeta para ensayar la soldadura por tracción

El ensayo por tracción permite conocer el estado de la unión entre paños de la geomembrana, sin embargo es una prueba que nos da una información de aspecto cualitativo ya que no permite comparar entre distintas tomas de muestras, ni tampoco entre materiales poliméricos de diferente naturaleza. Los resultados de esta prueba se asemejan a un ensayo de resistencia a la tracción en el sentido transversal de la geomembrana. El resultado se considera válido si la rotura de la probeta se produce en el borde o en las proximidades de la soldadura.

Con objeto de obtener una información cuantitativa de la resistencia de la soldadura se realiza el mismo ensayo pero por el procedimiento de pelado. Este ensayo permite la comparación entre las uniones de las distintas geomembranas sintéticas.

Las probetas empleadas en este caso son rectangulares de 300 mm x 50 mm y la longitud del solapo debe ser ≥ 25 mm de forma que las mordazas puedan ejercer un correcto agarre en la probeta. Esta disposición se puede observar en la Figura 3.18. La velocidad de desplazamiento es de 100 mm/min realizándose el ensayo hasta el despegue de la unión o la rotura de la probeta. El resultado se expresa a través de la medida de la carga máxima registrada en Newton, asimismo se debe indicar el lugar donde se produce la rotura, es decir, dentro o fuera de la unión. También se debe indicar si se produce deslaminación, descarné o cualquier otro defecto que pueda tener lugar durante el ensayo.

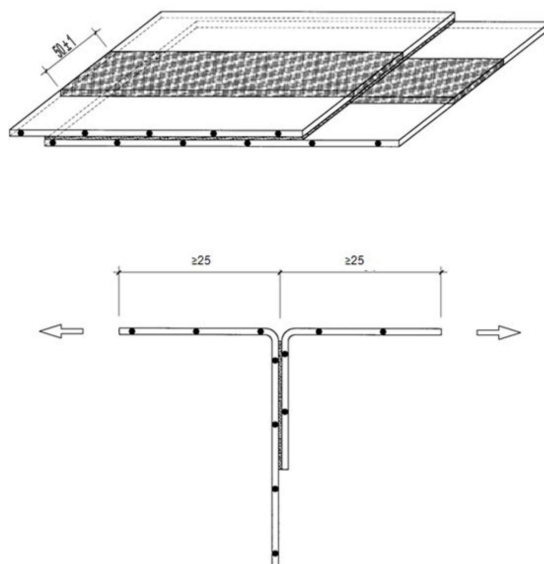


Figura 3.18. Probeta para ensayar la soldadura por pelado (AENOR 2015)

3.5. ESTUDIO MICROSCÓPICO

Las técnicas de microscopia óptica y electrónica permiten observar la textura y morfología de la geomembrana y buscar alteraciones en la superficie de la lámina que no son visibles de otro modo. Las microfotografías de las muestras a distintos aumentos muestran la porosidad de la lámina, grietas y microfisuras, como alteraciones físicas, e incluso restos de otros materiales con los que pueda haber estado en contacto la lámina estudiada (Blanco et al. 2002; Soriano et al. 2005, 2012, 2013)

3.5.1. MICROSCOPIA ÓPTICA DE REFLEXIÓN

Esta técnica se realiza para evaluar la degradación superficial de las geomembranas instaladas, a través del tiempo, comparándolas con una muestra del material inicial.

El estudio de las muestras se llevó a cabo mediante un microscopio LEICA modelo DMRX, equipado con un sistema automático de fotografía (Figura 3.19). Las fotografías se tomaron a 40 y 60 aumentos con objeto de ver más detalladamente la textura y morfología de la geomembrana.



Figura 3.19. Microscopio Leica DMRX

Las muestras no requieren una preparación previa para su observación en el microscopio óptico. El procedimiento consiste en tomar un fragmento de la muestra extraída de la balsa y rastrearlo en toda su extensión con objeto de evaluar la textura superficial y determinar posibles imperfecciones del material.

3.5.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

El análisis se ha realizado mediante el empleo de un microscopio electrónico de barrido ZEISS, modelo EVO 50 equipado con un espectrómetro de dispersión de energía de rayos X OXFORD Instruments, modelo INCA Pentafet X3. Las fotografías se tomaron a 90 y 900 aumentos para estudiar de forma más detallada la superficie de las muestras (Figura 3.20).

El procedimiento de preparación de las muestras poliméricas es laborioso debido a que, al no ser conductoras, tienen que ser metalizadas previamente al estudio microscópico. En primer lugar la muestra, que ha sido secada durante 48 horas, se adhiere a un portamuestras metálico con una solución coloidal de grafito en isopropanol al 20% hasta generar una capa continua semiconductora entre la muestra, el grafito y el portamuestras. Una vez concluido este proceso, se recubre el material con una capa de oro-paladio, por el sistema de pulverización catódica o “sputtering” que consiste en someter la muestra a una presión de vacío en una atmósfera en estos dos elementos, controlando el espesor de dicha capa para que sea homogéneo con un valor de $2\mu\text{m}$. La metalización se ha efectuado de forma automática con una metalizadora EMITECH, modelo K550 (Figura 3.21).



Figura 3.20. Microscopio electrónico EVO 50



Figura 3.21. Metalizadora EMITECH

3.6. TÉCNICAS INSTRUMENTALES

3.6.1. ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (IR-TF)

El espectro de infrarrojo de los plastificantes se llevó a cabo con un espectrómetro de la firma NICOLET 310 FTIR con un rango de barrido desde 400 cm^{-1} hasta 4000 cm^{-1} .

Los espectrómetros de transformada de Fourier presentan una relación señal/ruido mejor que las de los instrumentos dispersivos de buena calidad en más de un orden de magnitud. El aumento de la relación señal/ruido tiene interés en barridos rápidos de forma que se pueden obtener buenos espectros de infrarrojo en unos pocos segundos de análisis. Además los espectrómetros FTIR proporcionan una resolución constante en todo el espectro, no presentan los efectos de polarización de la luz ni saltos en la línea base producidos por los cambios en la apertura del monocromador (Skoog y Leary 1994).

La espectroscopia infrarroja es una de las técnicas más importantes en el análisis químico de compuestos orgánicos. El espectro de un compuesto orgánico presenta un determinado número de bandas de absorción asociadas a ciertas unidades estructurales de la molécula.

Las vibraciones de los enlaces covalentes $-C-H-$, $-C=O$, $-C=C-$, $-COOH$, etc., se repiten en un gran número de moléculas de diferentes compuestos orgánicos. Esta repetición en la aparición de bandas debida a unidades estructurales determinadas ha llevado a la designación de las frecuencias características de los distintos grupos funcionales orgánicos (Ortega, J.J. y Blanco, M. 1982).

En base a esto se determinaron los espectros de infrarrojo de los plastificantes extraídos de la geomembrana de PVC-P. Las bandas de absorción presentes en los espectros mostraron la presencia de radicales alquilo, grupos aromáticos y grupos carbonilo que junto con bandas específicas de sustitución de grupos aromáticos permitieron establecer, de forma cualitativa, que la estructura química de los plastificantes eran compuestos derivados de ftalatos de alquilo orto sustituidos.

3.6.2. CROMATOGRAFIA DE GASES ACOPLADA CON ESPECTOMETRIA DE MASAS

Estas dos técnicas instrumentales se complementan de forma que permiten establecer la estructura final de los plastificantes extraídos de la geomembrana.

La cromatografía de gases tiene una importante aplicación en el campo del análisis químico de forma que permite la separación de compuestos en una mezcla compleja y posterior identificación, tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo.

La cromatografía de gases separa los componentes individuales de una muestra de, siendo el tiempo de retención de los correspondientes picos cromatográficos el dato disponible para la identificación de cada uno de ellos. Este dato no es suficiente para una identificación exacta, sobre todo cuando analizamos muestras con un número elevado de componentes, como sucede en el caso del plastificante de la geomembrana de PVC-P (Ortega, J.J. y Blanco, M. 1985)

Para complementar la cromatografía de gases, se hizo uso de la espectrometría de masas que es capaz de identificar de manera casi inequívoca cualquier sustancia pura, pero normalmente no es capaz de identificar los componentes individuales de una mezcla sin separarlos previamente (Blanco et al. 2009b; Faraldos, M. y Goberna, C. 2012)

El espectro de masas de un compuesto puro proporciona diversos tipos de datos que son útiles para su identificación. El primero es el peso molecular y el segundo es su fórmula

química. Para los compuestos que pueden ionizarse, dando el ion molecular o un ion molecular protonado, el espectrómetro de masas es una herramienta inmejorable para la determinación del peso molecular. Las fórmulas moleculares se pueden determinar a partir del espectro de masas de un compuesto, siempre que el pico del ion molecular pueda ser identificado y su masa exacta determinada.

La identificación de los plastificantes de la geomembrana de PVC-P y su determinación estructural, se ha realizado empleando un cromatógrafo GC Agilent 6890N con una columna capilar de fenilmetilpolisiloxano DB%-MS (30 m, 0,25 mm x 0,25 μ m) acoplado a un sistema de detector de masas cuadrupolo Agilent 5793 MSD en modo de impacto electrónico.

3.7. OTRAS CARACTERÍSTICAS

La vida útil de las geomembranas es uno de los temas más estudiados actualmente. Para las geomembranas de PVC-P la característica principal a evaluar es la pérdida de plastificantes (Blanco 2016). En los cauchos, como el EPDM, las características que indican el final de su vida útil pueden considerarse la dureza Shore-A y el alargamiento en la rotura (Blanco et al. 2016). El “end of life” de las geomembranas de PEAD es la más estudiada en la literatura científica debido a la importancia que tiene este material, no solamente en el campo de la obra hidráulica sino en el de vertederos. Aunque se están considerando distintas pruebas como la determinación del índice de carbonilo, para establecer el tiempo de vida útil, las más citadas desde este punto de vista son la resistencia al agrietamiento por esfuerzos medioambientales (“stress cracking”) y el tiempo de inducción a la oxidación (TIO) (Noval et al. 2014, Blanco 2016).

3.7.1. DUREZA SHORE-A

El caucho terpolímero de etileno-propileno-monómero diénico (EPDM) es un material termoestable, muy flexible, por lo que se determina la dureza Shore-A y no la dureza Shore-D propia de materiales más rígidos como son los termoplásticos.

La determinación se llevó a cabo con un durómetro Zwick según la norma ISO 7619-1 (AENOR 2011b). La medida se ha realizado sobre diez puntos de las probetas. La Figura 3.22 presenta el durómetro donde se efectuaron las pruebas.



Figura 3.22. Durómetro Shore ZWICK

3.7.2. AGRIETAMIENTO POR ESFUERZOS MEDIAMBIENTALES (“STRESS CRACKING”)

Este ensayo se define como el tiempo requerido para que se produzca la rotura de una probeta sumergida en un medio particular a una temperatura elevada mientras está sometida a un esfuerzo definido. Este ensayo sólo es aplicable a materiales semicristalinos, como es el caso del PEAD.

La prueba se realizó siguiendo lo indicado en la norma UNE EN 14576 (AENOR 2006); es conocida como de “punto único”, donde las probetas con una incisión o muesca del 20% de su espesor nominal, se ensayan aplicando el 30% del esfuerzo de fluencia del material, y se registra el tiempo de deterioro expresado en horas. La temperatura del líquido del ensayo es 50 ± 1 °C durante todo el tiempo de exposición. El reactivo utilizado es una solución al 10% de un agente tensoactivo. Se ensayaron cinco probetas en cada uno de los sentidos. El resultado final en cada uno de los sentidos es la media aritmética de los valores obtenidos. Según la normativa europea, en una geomembrana original de PEAD, el tiempo mínimo para poder superar el ensayo es de 336 horas de exposición sin que se produzca la ruptura de la probeta (AENOR 2013a). El ensayo se realizó en un equipo BT-Technology, serie WB1120C-1. La Figura 3.23 muestra el equipo para la determinación del “stress cracking” en el laboratorio del Área de Materiales.



Figura 3.23. Equipo para la determinación del “stress cracking”

3.7.3. TIEMPO DE INDUCCIÓN A LA OXIDACIÓN

El valor del tiempo de inducción a la oxidación, TIO, se corresponde con el tiempo necesario para que una probeta de PEAD alcance la oxidación, en condiciones isoterma de oxígeno puro. Cuando la probeta de análisis esté estabilizada con antioxidantes, este TIO se corresponderá con el tiempo necesario para el consumo total de los antioxidantes.

La determinación del TIO se realizó de acuerdo a la norma UNE EN 728 (AENOR 1997b). Para efectuar este análisis, las probetas de PEAD con masa comprendida entre 5.0 mg y 6.0 mg, se colocan en cápsulas de aluminio cerradas herméticamente antes de ser calentadas bajo atmósfera de nitrógeno entre los 40 °C y los 200 °C. La velocidad de calentamiento es de 20 °C/min. Después de una isoterma de 3 minutos para estabilizar la temperatura, se cambia la atmósfera de nitrógeno a oxígeno, hasta que se alcanza la oxidación de la probeta. Esta oxidación se observa mediante la aparición de un pico exotérmico en el gráfico de flujo de calor frente al tiempo. El caudal de ambos gases, N₂ y O₂, es siempre de 50 ml/min. El resultado final de TIO se expresa en minutos, y se corresponde con el tiempo de oxidación de la probeta en la atmósfera oxidante. El ensayo se llevó a cabo con un calorímetro diferencial de barrido DSC Q-100 TA Instruments.

3.8. BIBLIOGRAFÍA

AENOR (1995) *UNE 104423, Materiales sintéticos. Puesta en obra. Sistemas de impermeabilización de embalses para riego o reserva de agua con geomembranas impermeabilizantes formadas por láminas de poli(cloruro de vinilo) plastificado (PVC-P) no resistentes al betún.*

AENOR (1996) *UNE EN ISO 527-3, Plásticos. Determinación de las propiedades de tracción. Parte 3: Condiciones de ensayo para películas y hojas.*

AENOR (1997a) *UNE EN ISO 527-4, Plásticos. Determinación de las propiedades de tracción. Parte 4: Condiciones de ensayo para plásticos compuestos isotrópicos y ortotrópicos reforzados con fibras.*

AENOR (1997b) *UNE EN 728. Sistemas de canalización y conducción en materiales plásticos. Tubos y accesorios de poliolefina. Determinación del tiempo de inducción a la oxidación.*

AENOR (2000a) *UNE 104300, Plásticos. Láminas de polietileno de alta densidad, PEAD, para la impermeabilización en obra civil. Características y métodos de ensayo.*

AENOR (2000c) *UNE 104302, Plásticos. Láminas de poli(cloruro de vinilo) plastificado, para la impermeabilización de cubiertas de edificios. Características y métodos de ensayo.*

AENOR (2000b) *UNE 104303, Materiales sintéticos. Láminas de poli(cloruro de vinilo) plastificado, PVC-P, con o sin armadura, no resistentes al betún, para la impermeabilización de embalses, depósitos, piscinas, presas y canales para agua. Características y métodos de ensayo”.*

AENOR (2000d) *UNE 104306, Materiales sintéticos. Determinación del contenido en plastificantes en láminas de poli(cloruro de vinilo) plastificado, PVC-P, utilizadas en impermeabilización.*

AENOR (2006) *UNE-EN 14 576. Geosintéticos. Método de ensayo para la determinación de la resistencia de las barreras geosintéticas poliméricas al agrietamiento por esfuerzos medioambientales.*

AENOR (2008a) *UNE EN ISO 291, Plásticos. Atmósferas normalizadas para acondicionamiento y ensayos.*

AENOR (2008b) *UNE 104426, Impermeabilización. Puesta en obra. Construcción de balsas cubiertas impermeabilizadas con geomembranas sintéticas.*

AENOR (2010) *UNE EN 1849-2, Láminas flexibles para la impermeabilización. Determinación del espesor y de la masa por unidad de superficie. Parte 2: Láminas plásticas y de caucho.*

AENOR (2011a) *UNE 104317, Impermeabilización. Determinación del recorrido del punzón antes de la perforación en geomembranas sintéticas impermeabilizantes instaladas en balsas.*

AENOR (2011b) *ISO 7619-1. Caucho vulcanizado o termoplástico. Determinación de la dureza por indentación. Parte 1: Método del durómetro (Durezas Shore).*

AENOR (2012) *UNE EN ISO 527-1, Plásticos. Determinación de las propiedades de tracción. Parte 1: Principios generales.*

AENOR (2013b) *UNE-EN 495-5, Láminas flexibles para impermeabilización. Determinación de la plegabilidad a baja temperatura. Parte 5: Láminas plásticas y de caucho para la impermeabilización de cubiertas.*

AENOR (2013a) *UNE EN 13361, Barreras geosintéticas. Requisitos para su utilización en la construcción de embalses y presas.*

AENOR (2015) *UNE 104304, Materiales sintéticos. Puesta en obra. Determinación de la resistencia de la soldadura por pelado entre láminas sintéticas instaladas utilizadas en impermeabilización.*

Aguiar, E. y Blanco, M. (2000). *El Saltadero, un caso atípico en la obra hidráulica: un embalse cubierto. Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural.* Punta del Este. Uruguay.

Aguiar, E., Vara, T., Blanco, M., García, F., Soriano, J., Castillo, F., Martín, A. y García, C. (2012). *El Saltadero: An experimental field to check the behavior of synthetic geomembranes under weathering exposure*, in Blanco et al. (Eds.) Eurogeo5, Ed. R. B. Servicios Editoriales, S. L.: Vol. 2: 7-14 (electronic proceedings) Vol. 1: 217-224 (printed volumes). Valencia, septiembre.

Amigó, E. y Aguiar, E. (1994). *Manual para el diseño, construcción y explotación de embalses impermeabilizados con geomembranas*. Consejería de Agricultura y Alimentación. Gobierno de Canarias.

Beltrán, M. y Marcilla, A. (2012). *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades*. Ed. Universidad de Alicante.

Blanco, M. (2016). *Geomembranas*. Jornada sobre geosintéticos en obras hidráulicas y medio ambiente. Santa Cruz de La Palma, noviembre. Sevilla, noviembre-diciembre.

Blanco, M. y Aguiar, E. (1993). *Comportamiento de láminas de poli(cloruro de vinilo) plastificado, utilizadas en la impermeabilización en el norte de Tenerife*. Ingeniería Civil, **88**, 5-20.

Blanco, M. y Aguiar, E. (2000). *Aspectos más relevantes del comportamiento en obra de los materiales sintéticos utilizados como geomembranas impermeabilizantes en embalses ubicados en la Comunidad Autónoma de Canarias*. Ingeniería Civil, **117**, 25-35.

Blanco, M., Aguiar, E. Vara, T., García, F., Soriano, J. y Castillo, F. (2009a). *Comportamiento de geomembranas sintéticas instaladas en el campo experimental de El Saltadero*. Ingeniería Civil **153**, 37-44.

Blanco, M., Aguiar, E. y Zaragoza, G. (2000). *Características iniciales de geomembranas sintéticas de diferente naturaleza utilizadas en la impermeabilización de embalses*. Ingeniería Civil **120**, 77-88.

Blanco, M., Castillo, F., García, F., Mateo, B., Solera, R., García, C. Cea, J. C. de y García-Wolfrum, S. (2012). *Monitoring of synthetic geomembranes used for waterproofing in hydraulic works*, in Blanco et al. (Eds.) Eurogeo5, Ed. R. B. Servicios Editoriales, S. L.: Vol. 2: 64-69 (electronic proceedings) Vol.1: 274-279 (printed volumes). Valencia, septiembre.

- Blanco, M., Castillo, F., Noval, A. M., Aguiar, E., Vara, T. Amat, B., Touze-Foltz, N. y Farcas, F. (2016). *Long term behavior and life expectancy of EPDM geomembranes installed in water reservoirs*. Eurogeo6. 403-416. Ljubljana, septiembre.
- Blanco, M., Cea, J. C. y García, F. (2005). *Algunas consideraciones a tener en cuenta a la hora de impermeabilizar una balsa con geomembranas sintéticas*. Proc. I Simposio nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas. Sevilla, diciembre.
- Blanco, M., Cuevas, A., Castillo, F. y Aguiar, E. (1996). *Puesta a punto de una nueva metodología experimental para la determinación de la resistencia a la perforación de geomembranas sintéticas*. Ingeniería Civil **103**, 65-69.
- Blanco, M., Rico, G., Pargada, L., Aguiar, E. y Castillo, F. (2009b). *Determinación de los ftalatos utilizados como aditivos en la geomembrana de la balsa de La Florida mediante cromatografía de gases-espectrometría de masas*. Ingeniería Civil, **154**, 87-95.
- Blanco, M., Soriano, J., Aguiar, E. y Zaragoza, G. (2002). *Análisis microscópico de geomembranas sintéticas utilizadas en la impermeabilización de embalses*. Ingeniería Civil **127**, 51-59.
- Faraldos, M. y Goberna, C. (2012). *Técnicas de análisis y caracterización de materiales*. Ed. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 2ª Ed.
- International Commission on Large Dams (2010). *Geomembrane Sealing Systems for Dams. Design principles and review of experience*. Bulletin ICOLD N° 135. París.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2010). *Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas*. Ed. Comité Nacional Español de Grandes Presas.
- Noval, A. M., Blanco, M., Farcas, F. y Touze-Foltz, N (2014). *End of life of HDPE geomembranes used to waterproofing reservoirs*. Geomembrane workshop Berlin-2: Developing a protocol to determine the remaining service life of installed exposed HDPE geomembranes, Berlín, septiembre.
- Ortega, J.J. y Blanco, M. (1982). *Identificación de compuestos orgánicos por espectroscopia infrarroja*. Publicación CEDEX. Monografía M-4. Editado por Safer. Madrid.

Ortega, J.J. y Blanco, M. (1985). *La cromatografía de gases y su aplicación al análisis orgánico*. Publicación CEDEX. Monografía M-6. Ed. CEDEX. Madrid.

Skoog, D.A. y Leary, J.J. (1994). *Análisis instrumental*. Ed. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A. 4ª Edición.

Soriano, J. Blanco, M., Burgos, J., Aguiar, E., Zaragoza, G. y García, M.A. (2005). *Las microscopías óptica de reflexión y electrónica de barrido como técnicas avanzadas en el conocimiento del estado de las geomembranas sintéticas*. Proc. I Simposio Nacional sobre Proyecto, Construcción e Impermeabilización de Balsas. Sevilla, diciembre.

Soriano, J., Blanco, M., García, M. A., Leiro, A., Mateo, B., Burgos, J., Aguiar, E., Rubín de Célix, M. (2012). *Optical and scanning electron microscopy as advanced analysis methods to determine the condition of synthetic geomembranes*, in Blanco et al. (Eds.) Eurogeo5, Ed. R. B. Servicios Editoriales, S. L.: Vol. 2: 266-273 (electronic proceedings) Vol. 1: 475-482 (printed volumes). Valencia, septiembre.

Soriano, J. Blanco, M., García, M.A., Leiro, A., Mateo, B., Aguiar, E. y Rubín de Célix, M. (2013). *Las microscopías óptica de reflexión y electrónica de barrido como métodos avanzados de análisis para conocer el estado de las geomembranas sintéticas*. Ingeniería Civil **171**, 135-144.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS DE LA GEOMEMBRANA DE PVC-P INSTALADA EN LA Balsa DE EL SALTADERO

CAPITULO 4. RESULTADOS DE LA GEOMEMBRANA DE PVC-P INSTALADA EN LA Balsa DE EL SALTADERO

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA Balsa DE EL SALTADERO

El depósito regulador del El Saltadero fue proyectado en el Plan Hidráulico Insular elaborado por el Cabildo Insular de Tenerife en el año 1967. La balsa de El Saltadero, una de las estructuras hidráulicas pioneras en este Plan Hidráulico Insular, se construyó para albergar 0.5 hm³ de capacidad y 20 metros de altura de agua (BALTEN 2010).

La impermeabilización de la balsa se llevó a cabo con un sistema impermeabilizante constituido por un geotextil impregnado de un material polimérico de aplicación “in situ”.

La finalidad de la balsa de El Saltadero, situada en el término municipal de Granadilla de Abona, era abastecer de agua la zona sur de la isla de Tenerife.

El 27 de marzo de 1977 se produjo la mayor tragedia aérea de la historia de la aviación civil en el aeropuerto de Los Rodeos, debido a las malas condiciones climatológicas de la zona en la que está situado el aeropuerto, en San Cristóbal de La Laguna al norte de Tenerife. Por ello se aceleró la construcción de un nuevo aeropuerto en el sur de la isla.

La proximidad del embalse de El Saltadero al Aeropuerto Sur de Tenerife favoreció la afluencia de aves con objeto de abreviar en el embalse. Este hecho provocaba un peligro para la navegación aérea de la zona sur por lo cual se tuvo que proceder al vaciado del embalse, situación en la que estuvo durante varios años.

El incremento del turismo en la zona sur (Los Cristianos, Las Américas) por un lado y por otro el aumento de la actividad agrícola con gran cantidad de invernaderos dedicados a la producción de tomates y plátanos, hizo necesario volver a plantearse el llenado de la balsa.

En un principio se planteó cubrir la balsa con una estructura similar a la carpa de un circo, con varios mástiles actuando de soporte de la cubierta, debido a la gran extensión del embalse.

Hacia finales de los años 90 comenzaron a cubrirse una serie de balsas en la zona de Almería, concretamente en el término municipal de la Mojonera (balsas de La Rambla de

Carcáuz) (Blanco et al. 2008). En estas fechas, Técnicos de BALTEN se trasladaron a Almería con objeto de conocer este tipo de estructura.

Basándose y mejorando notablemente lo instalado en Almería, se cubrió la balsa con una malla de sombreo.

La instalación de la malla de sombreo se consideró un beneficio para reducir la evaporación y la formación de algas en las largas temporadas de almacenamiento del agua. Asimismo se consideró útil para proteger la pantalla de impermeabilización, debido al efecto de reducción de la radiación solar sobre la geomembrana de PVC.

La balsa del El Saltadero pertenece al grupo de “Grandes presas” debido a que cumple la condición de presentar una altura de agua superior a 15 m (20.60 m) según exige el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses (Boletín Oficial del Estado, número 78, de 30 de marzo de 1996).

La balsa se impermeabilizó con una geomembrana de PVC reforzado con tejido de hilos sintéticos de 1.50 mm de espesor. La superficie impermeabilizada en los taludes es de 27.170 m² y en el fondo 11.692 m², siendo el total del material empleado de 38.862 m².

4.2. COBERTURA DE SOMBREO SUSPENDIDA

La cobertura de sombreo instalada está formada por una doble malla ortogonal en dos capas formada por un cordón de poliamida de alta resistencia, entre la que se intercala dos láminas de sombreo de polietileno de alta densidad que reducen en un 85% el paso de luz, con anclaje perimetral en la coronación del embalse (Renz, O. 2005).

La malla de polietileno está tejida mediante un sistema que no permite que se deshaga y se disgreguen las fibras del material polimérico. El polietileno está tratado con los aditivos adecuados para proporcionar una elevada resistencia a la tensión así como una elevada protección frente a la radiación ultravioleta.

La superficie cubierta de la balsa de El Saltadero es de 38.000 m², quedando instalada a en el año 2000, fecha desde la que está cumpliendo su función correctamente.

La norma UNE 104426 “Impermeabilización. Puesta en obra. Construcción de balsas cubiertas impermeabilizadas con geomembranas sintéticas” (AENOR 2008) se redactó basándose en la experiencia alcanzada en la balsa de El Saltadero. Esta norma fue elaborada por el Comité Técnico AEN/CTN 104 “Materiales impermeabilizantes para la construcción”, con el objeto de definir las características necesarias de las mallas de polietileno empleadas como cobertura de sombreo.

La Figura 4.1 muestra una vista panorámica de la balsa de El Saltadero donde se puede apreciar la extensión de la cubierta. La Figura 4.2 muestra el interior de la balsa. En las Figuras 4.3 y 4.4 se observa con detalle la cubierta de sombreo en su parte exterior e interior, respectivamente.



Figura 4.1. Vista panorámica de la balsa de El Saltadero

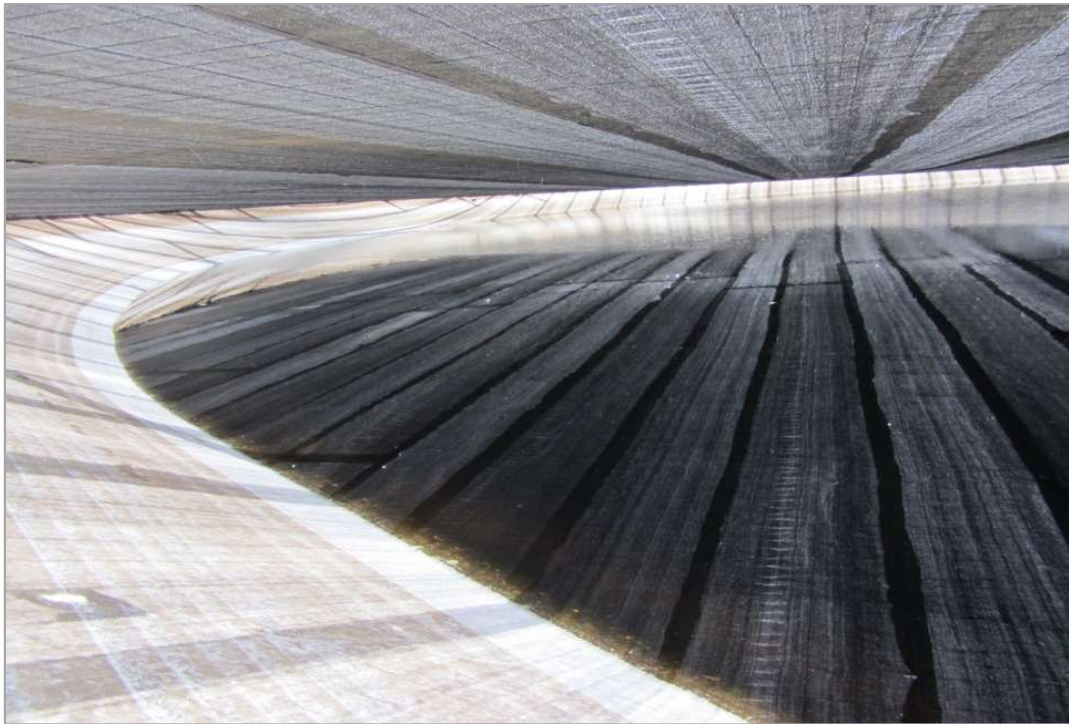


Figura 4.2. Vista del interior de la balsa de El Saltadero.

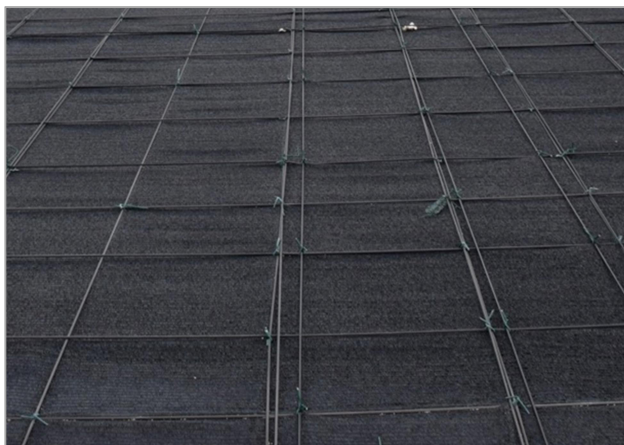


Figura 4.3. Detalle de la cobertura de sombreo suspendida de El Saltadero. Exterior.



Figura 4.4. Detalle de la cobertura de sombreo suspendida de El Saltadero. Interior.

4.3. CLIMATOLOGIA DE LA ISLA DE TENERIFE

El archipiélago Canario se halla al Noroeste del Continente Africano, entre las latitudes 27° 37' y 29° 25' Norte (situación subtropical) y las longitudes 13° 20' y 18° 10' al Oeste de Greenwich. El clima debe sus rasgos fundamentales a la situación del archipiélago bajo la influencia de una alta presión subtropical y del anticiclón de las Azores, del que parten los “vientos alisios”, que en Canarias llevan la dirección NE – SO.

La Isla de Tenerife es la de mayor altura y superficie de las Islas Canarias. Esta geografía y la influencia de los vientos alisios hacen que exista un gran contraste entre el norte y el sur de la isla. La zona norte presenta un clima subtropical con abundancia de lluvias y la zona sur es árida y con menos precipitaciones anuales.

Los datos climatológicos que figuran en la Tabla 4.1 proceden de la Agencia Estatal de Meteorología y han sido obtenidos en la estación meteorológica situada en el Aeropuerto de Tenerife Sur (Altitud: 64 m. Latitud: 28° 2' 49" N Longitud: 16°33'40" O) que es la estación más próxima a la balsa de El Saltadero.

Los citados valores de la Tabla 4.1 corresponden a los valores medios registrados entre los años 1981 y 2010.

Se han obtenido datos más recientes procedentes de la estación meteorológica de las Galletas situada en la cota 73 en el municipio de Arona, próximo a la balsa. Esta estación pertenece a la entidad Agrocabildo (Cabildo de Tenerife) que se encarga de la asistencia y asesoramiento para la mejora tecnológica de las producciones agrícolas y ganaderas. Dispone de una red de estaciones meteorológicas repartidas en la Isla de Tenerife en las que se recogen los valores climatológicos diarios, mensuales y anuales.

Los valores que figuran en la Tabla 4.2 corresponden al año agrícola 2015-2016. En dicha tabla puede observarse los datos de temperatura, humedad, velocidad del viento y radiación total.

Se observa que, según los datos correspondientes al año agrícola 2015-2016, la temperatura media ha oscilado entre 17°C y 24°C y la humedad relativa media entre un 46% y 77%. Asimismo se aprecia que en los meses de junio y agosto la radiación es más elevada que en el resto de los meses del año.

Tabla 4.1. Valores climatológicos medios del Aeropuerto Tenerife Sur (1981-2010)

Mes	T	TM	Tm	R	H	DR	DN	DT	DF	DH	DD	I
Enero	18.4	21.7	15.2	17	62	1.8	0.0	0.2	0.1	0.0	8.3	193
Febrero	18.5	22.0	15.0	20	64	2.2	0.0	0.2	0.0	0.0	8.9	195
Marzo	19.3	23.1	15.6	15	63	1.9	0.0	0.4	0.1	0.0	9.2	226
Abril	19.5	23.1	16.0	7	65	1.1	0.0	0.0	0.1	0.0	6.4	219
Mayo	20.4	23.9	17.0	1	66	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	246
Junio	22.1	25.4	18.8	0	68	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.3	259
Julio	24.0	27.7	20.2	0	65	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.8	295
Agosto	24.7	28.4	21.1	1	67	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	16.6	277
Septiembre	24.5	27.9	21.1	4	68	0.6	0.0	0.1	0.0	0.0	9.2	213
Octubre	23.4	26.8	20.0	12	67	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	6.9	214
Noviembre	21.5	24.8	18.2	26	64	1.9	0.0	0.3	0.0	0.0	6.1	193
Diciembre	19.7	22.8	16.5	30	66	3.5	0.0	0.3	0.0	0.0	6.3	195
Año	21.4	24.8	17.9	132	66	15.2	0.0	1.5	0.3	0.0	114.0	-

Leyenda

T Temperatura media mensual/anual (°C)
 TM Media mensual/anual de las temperaturas máximas diarias (°C)
 Tm Media mensual/anual de las temperaturas mínimas diarias (°C)
 R Precipitación mensual/anual media (mm)
 H Humedad relativa media (%)
 DR Número medio mensual/anual de días de precipitación superior o igual a 1 mm
 DN Número medio mensual/anual de días de nieve
 DT Número medio mensual/anual de días de tormenta
 DF Número medio mensual/anual de días de niebla
 DH Número medio mensual/anual de días de helada
 DD Número medio mensual/anual de días despejados
 I Número medio mensual/anual de horas de sol

Tabla 4.2. Valores climatológicos de la estación de las Galletas (www.Agrocabildo.org)

Estación: GALLETAS				Desde el 01/09/2015 hasta el 30/08/2016							
Fecha	T	TM	Tm	P	HR	HRM	HRm	Vo	VMax	Rad	
sep-2015	23,3	29,2	18,2	5,0	77,3	98,1	53,2	0,6	2,1(NE)	3.784,4	
oct-2015	22,2	28,0	17,7	62,4	77,5	97,6	53,7	0,7	2,2(NE)	3.340,4	
nov-2015	20,7	26,8	15,3	0,0	64,6	87,6	43,7	1,1	2,6(N)	3.150,6	
dic-2015	19,2	25,4	12,6	5,8	57,0	88,1	36,9	1,0	2,4(NE)	3.273,7	
ene-2016	17,8	25,4	11,3	0,0	71,2	96,3	44,1	0,8	2,5(S)	3.896,0	
feb-2016	16,8	23,6	11,4	7,4	73,3	95,2	48,5	0,7	2,3(E)	4.231,1	
mar-2016	16,9	22,8	11,3	1,0	70,4	93,5	48,7	1,0	2,9(N)	4.699,6	
abr-2016	18,3	23,6	13,1	0,5	72,5	94,9	51,1	0,9	2,6(N)	5.565,1	
may-2016	19,2	24,9	13,9	1,0	70,8	93,9	49,8	1,0	2,7(N)	5.734,8	
jun-2016	21,4	27,4	15,9	0,1	73,9	95,5	50,4	0,7	2,3(E)	6.226,8	
jul-2016	23,4	30,3	18,1	0,0	52,7	71,8	36,7	0,3	1,3(SW)	5.178,9	
ago-2016	23,9	31,9	18,2	0,0	46,3	61,4	30,4	0,7	2,4(N)	6.843,7	
* Media	20,3 *	26,6 *	14,8 *	83,2 **	67,3 *	89,5 *	45,6 *	0,8 *	2,3 *	4.660,4 *	
** Total											

Leyenda:

T: Temperatura media (°C)
 TM: Temperatura máxima absoluta (°C)
 Tm: Temperatura mínima absoluta (°C)
 P: Precipitación (mm)
 HR: Humedad relativa media (%)
 HRM: Humedad relativa máxima absoluta (%)
 HRm: Humedad relativa mínima absoluta (%)
 Vo: Velocidad media del viento (m/s)
 VMax: Velocidad y Dirección máxima media por cada 10 minutos (m/s ° sexagesimales)
 Rad: Radiación Total (Wh/m² - día)
 ND: Dato no disponible
 ET o PM: Evapotranspiración calculada por el método FAO-56

4.4. MUESTRAS EXTRAÍDAS DE LA Balsa DE EL SALTADERO

Las muestras estudiadas a lo largo de los 16 años de inspección en la geomembrana de PVC-P corresponden a diferentes puntos de la balsa. Se han extraído muestras de la zona norte y sur así como de diferentes profundidades de la balsa.

En la Figura 4.5 se presenta una fotografía aérea de la balsa de El Saltadero y las zonas de donde se han extraído muestras. En la citada fotografía también se ha marcado la situación del campo experimental.



Figura 4.5. Balsa de El Saltadero. Zonas de extracción de muestras

A continuación se van a exponer los resultados obtenidos en los ensayos realizados a la geomembrana que impermeabiliza la balsa de El Saltadero. Posteriormente dichos resultados se analizarán de acuerdo a lo alcanzado en los ensayos físico-químicos y mecánicos. Asimismo, se tendrán en cuenta los datos observados en el estudio microscópico y los aportados con las técnicas de espectroscopia IR-TF, cromatografía de gases y espectrometría de masas. Finalmente, se evaluará la degradación de la geomembrana y se relacionará con los parámetros que más afectan a su durabilidad.

4.5. EXPERIMENTAL

4.5.1. CARACTERISTICAS FISICO-QUÍMICAS

4.5.1.1. Espesor

Los datos de espesor de la geomembrana en la zona de coronación e intermedia del talud norte se muestran en la Figura 4.6. Se observa que el espesor disminuye gradualmente a lo largo del tiempo en las dos zonas del talud. El espesor inicial es 1.51 mm disminuyendo hasta 1.40 mm en coronación y hasta 1.35 mm en la zona intermedia a los 16 años de la instalación de la geomembrana.

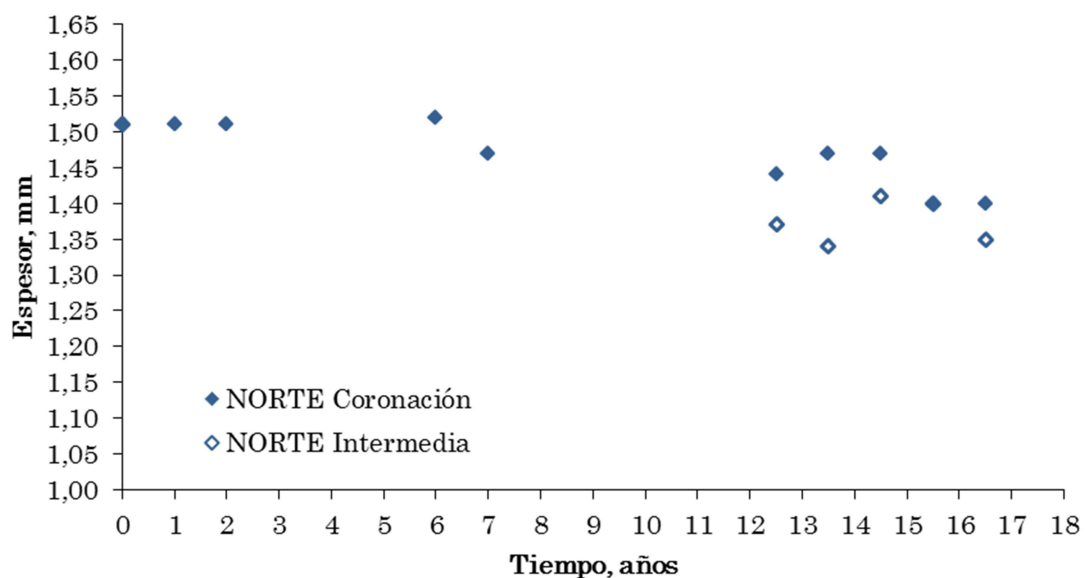


Figura 4.6. Evolución del espesor en el talud norte a lo largo del tiempo.

Los datos obtenidos del espesor de la geomembrana en el talud sur se muestran en la Figura 4.7. El espesor en la zona de coronación se mantiene ligeramente constante a lo largo del tiempo mientras que en la zona intermedia experimenta una disminución gradual pasando de un valor inicial de 1.51 mm hasta 1.40 mm a los 16 años.

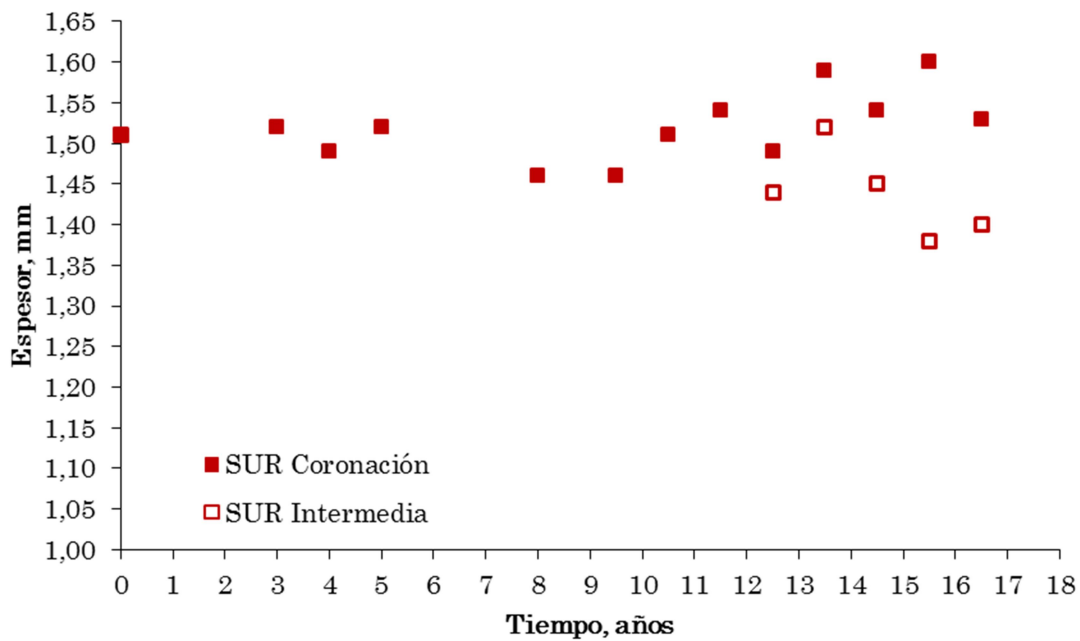


Figura 4.7. Evolución del espesor en el talud sur a lo largo del tiempo.

4.5.1.2. Doblado a bajas temperaturas

Los resultados del doblado a bajas temperaturas indican que la geomembrana comenzó a degradarse en el talud norte a los 14 años de su instalación. Se observa que la mitad de las probetas ensayadas rompen en el lugar de la flexión a -20°C , tanto en la zona de coronación como en la zona intermedia. A los 15 años rompen todas las probetas del material extraído de la zona de coronación (Tabla 4.3).

Los resultados obtenidos en el talud sur muestran una menor degradación que en el talud norte. El material extraído de la zona de coronación e intermedia solamente experimenta agrietamientos en el lugar de la flexión a los 16 años de la instalación de la geomembrana de PVC-P.

Esto indica que la geomembrana presenta una mayor degradación en el talud norte que en el sur.

Tabla 4.3. Resultados del doblado a -20°C en la muestras del talud norte y sur a diferentes profundidades.

TIEMPO, AÑOS	DOBLADO A -20°C			
	NORTE Coronación	NORTE Intermedia	SUR Coronación	SUR Intermedia
0-13	No Rompen			
14	Rompe la mitad	Rompe la mitad	No rompen	No rompen
15	Rompen todas	Rompe la mitad	No rompen	No rompen
16	Rompen todas	Rompe la mitad	Grietas	Grietas

4.5.1.3. Resistencia al impacto dinámico

El impacto dinámico llevado a cabo en la geomembrana de PVC no produjo ninguna perforación al caer el percutor desde una altura de 500 mm. Este resultado se comprobó posteriormente con la prueba de estanqueidad.

Los resultados del impacto dinámico se ven afectados por el envejecimiento de la geomembrana, debido a que se pierde flexibilidad y aumenta la rigidez de la misma. Esto conduce a que la perforación de la geomembrana tiene lugar a alturas de caída del percutor cada vez menores.

4.5.1.4 Contenido en plastificantes

Los plastificantes presentes en la geomembrana de PVC se extrajeron con el equipo automático de extracción descrito en el capítulo 3 de esta memoria.

Los datos obtenidos en el talud norte se muestran en la Tabla 4.4. El valor inicial del contenido en plastificantes de la geomembrana es de 34.3 % alcanzándose un valor de 16.1% en coronación y 18.3% en la zona intermedia a los 17 años de su instalación.

Tabla 4.4. Contenido en plastificantes del talud norte coronación en función del tiempo.

TIEMPO DE INSTALACIÓN, AÑOS	CONTENIDO EN PLASTIFICANTES, %	
	NORTE Coronación	NORTE Intermedia
0	34.3	34.3
1	31.7	-
2	31.7	-
3	28.1	-
7	26.2	-
12	22.3	20.3
13	22.3	20.1
14	18.1	18.3
15	16.1	18.3
16	16.1	18.3
17	16.1	18.3

La Figura 4.8 muestra el contenido en plastificantes en el talud norte. Se aprecia una disminución en las dos zonas del talud, coronación e intermedia. Asimismo se observa como esta disminución tiene lugar de una forma escalonada en las dos zonas de la geomembrana.

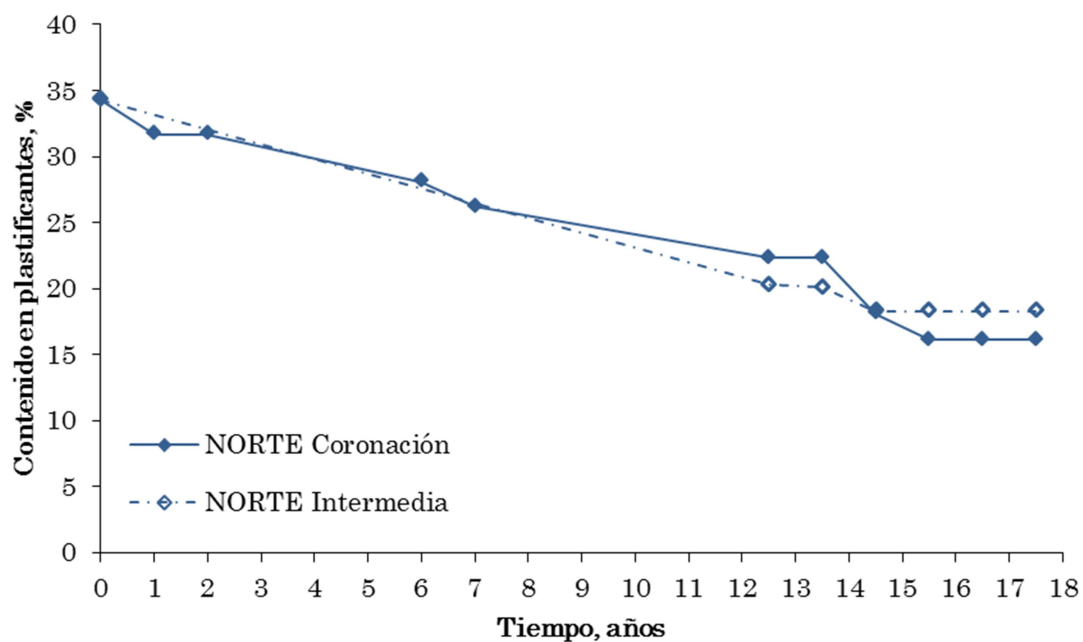


Figura 4.8. Evolución del contenido en plastificantes en el talud norte a lo largo del tiempo.

Los datos del contenido en plastificantes del talud sur se muestran en la Tabla 4.5. El valor inicial del contenido en plastificante es de 34.3% alcanzándose un valor de 18.1% en coronación y 17.9% en la zona intermedia a los 17 años de la puesta en obra de la geomembrana.

Se observa que el contenido en plastificantes en la zona de coronación disminuye de una forma más acusada a partir de los 10 años de la puesta en obra de la geomembrana.

La evolución del contenido en plastificante de la geomembrana en el talud sur se muestra en la Figura 4.9. Se observa una disminución a lo largo del tiempo de forma que partiendo de un valor inicial de 34.3 se alcanza un valor de 18.1% en coronación y 17.9 en la zona intermedia a los 17 años de la puesta en obra de la geomembrana. Se aprecia como esta disminución tiene lugar de forma escalonada a lo largo del tiempo.

Tabla 4.5. Contenido en plastificantes del talud sur coronación en función del tiempo.

TIEMPO DE INSTALACIÓN, AÑOS	CONTENIDO EN PLASTIFICANTES, %	
	SUR Coronación	SUR Intermedia
0	34.3	34.3
3	32.2	-
4	31.0	-
5	31.0	-
8	26.6	-
9	26.6	-
10	24.3	-
11	19.1	-
12	19.1	22.9
13	18.6	19.9
14	18.4	19.9
15	18.4	19.9
16	18.4	17.9
17	18.1	17.9

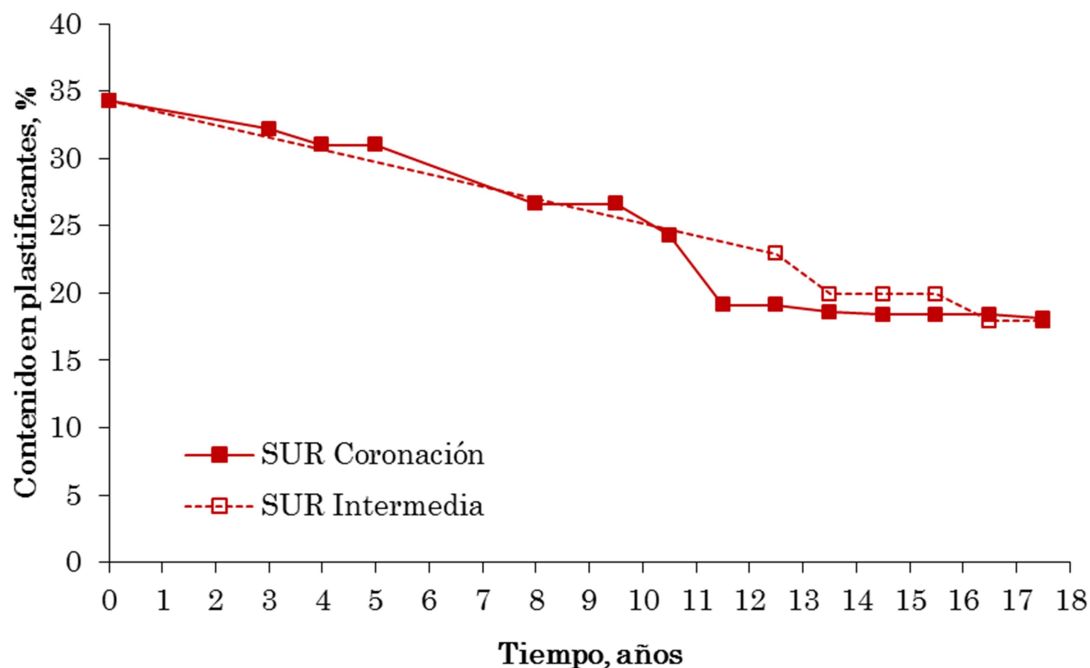


Figura 4.9. Evolución del contenido en plastificantes en el talud sur a lo largo del tiempo.

El seguimiento realizado en la geomembrana del fondo de la balsa no ha sido tan exhaustivo como el realizado en los taludes norte y sur debido a que la balsa no siempre se ha encontrado vacía. En la Tabla 4.6 se exponen los resultados del contenido en plastificantes del material extraído del fondo.

Tabla 4.6. Contenido en plastificantes del material extraído del fondo en función del tiempo.

TIEMPO DE INSTALACIÓN, AÑOS	CONTENIDO EN PLASTIFICANTES, %
0	34.3
12	29.8
17	22.5

Los datos obtenidos del material del fondo muestran un contenido en plastificantes superior al detectado en los taludes norte y sur.

4.5.2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

4.5.2.1. Resistencia a la tracción y alargamiento

La geomembrana de PVC-P instalada en la balsa de El Saltadero está reforzada con un tejido de hilos sintéticos. Los hilos se encuentran dispuestos perpendicularmente entre sí, dando lugar a la trama y urdimbre que constituye el refuerzo de la geomembrana. Una de las características de estos tejidos de refuerzo es la elevada resistencia a la tracción en el sentido de la urdimbre, que coincide con el sentido longitudinal de la fabricación de la geomembrana. La determinación de la resistencia a la tracción se ha realizado en el sentido longitudinal y transversal de fabricación de la geomembrana.

Los datos de la resistencia a la tracción en el punto de carga máxima en el talud norte a lo largo de los 16 años de su instalación se muestran en la Figura 4.10.

La resistencia a la tracción muestra una tendencia creciente en las zonas de coronación e intermedia del talud norte tanto en el sentido longitudinal como en el transversal.

El valor inicial es de 1270 N/50mm en sentido longitudinal obteniéndose unos valores de 1858 N/50mm y 1759 N/50mm en las zonas de coronación e intermedia, respectivamente, a los 16 años. En el sentido transversal el valor inicial es de 1205 N/50mm alcanzándose el valor de 1797 N/50mm y 1555 N/50mm en las zonas de coronación e intermedia, respectivamente.

La evolución de la resistencia a la tracción en el talud sur de la balsa de El Saltadero se muestra en la Figura 4.11. Se puede comprobar una tendencia creciente en las zonas de coronación e intermedia del talud sur, tanto en el sentido longitudinal como en el transversal de la geomembrana.

En este caso se parte, inicialmente, de 1270 N/50mm en sentido longitudinal obteniéndose un valor de 1786 N/50mm y 1914 N/50mm en las zonas de coronación e intermedia, respectivamente, a los 16 años. En el sentido transversal se pasa de un valor inicial de 1205 N/50mm a 1652 N/50mm y 1561 N/50mm en las áreas de coronación e intermedia, respectivamente.

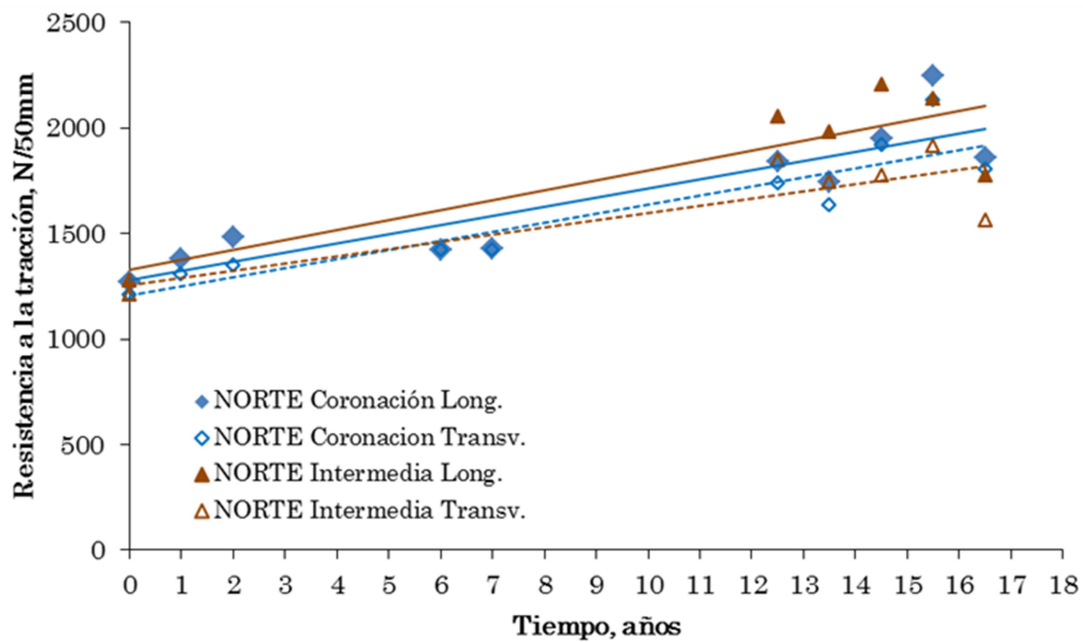


Figura 4.10. Evolución de la resistencia a la tracción en el punto de carga máxima en el talud norte a lo largo del tiempo

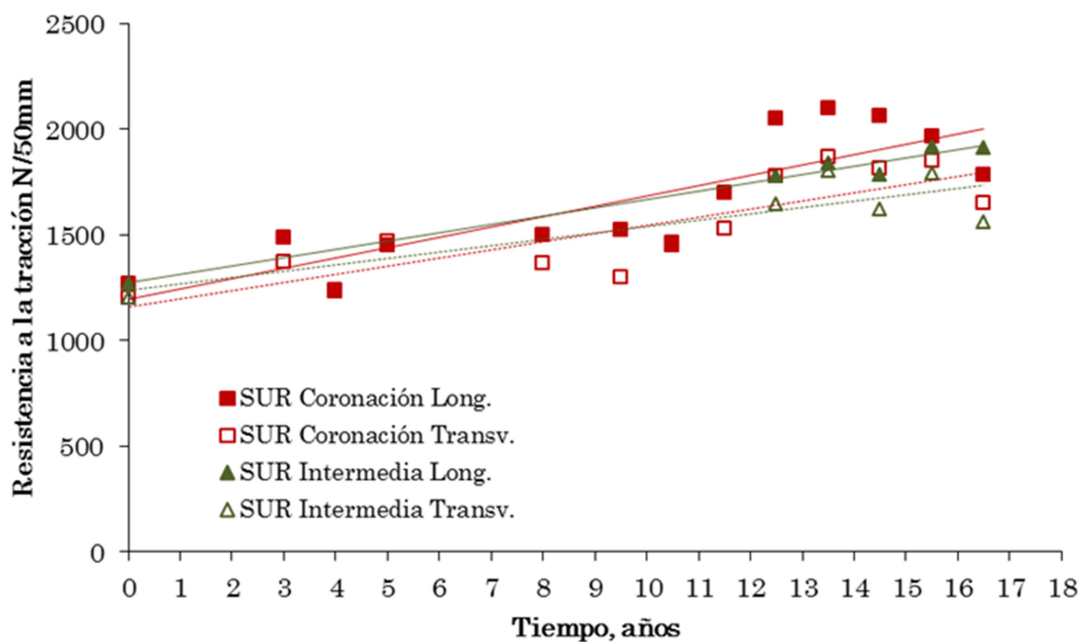


Figura 4.11. Evolución de la resistencia a la tracción en el punto de carga máxima en el talud sur a lo largo del tiempo

La evolución de la resistencia a la tracción en el punto de carga máxima en los dos taludes de la balsa de El Saltadero experimenta una tendencia creciente debido a la pérdida de flexibilidad de la geomembrana y al aumento de su rigidez. Asimismo, se observa que los datos del sentido longitudinal son superiores a los del sentido transversal debido a la constitución del tejido de refuerzo de la geomembrana.

La Figura 4.12 representa la evolución del alargamiento en el punto de carga máxima en el talud norte a lo largo del tiempo. Se aprecia una tendencia irregular en los datos obtenidos en el alargamiento. El dato original en el sentido longitudinal es de 22% alcanzándose los valores de 35% y 34% en las zonas de coronación e intermedia, respectivamente, a los 16 años de la puesta en obra de la geomembrana. Transversalmente se parte de 26% de elongación para llegar a 44% y 42% en las zonas de coronación e intermedia, respectivamente, a los 16 años de aplicada la geomembrana.

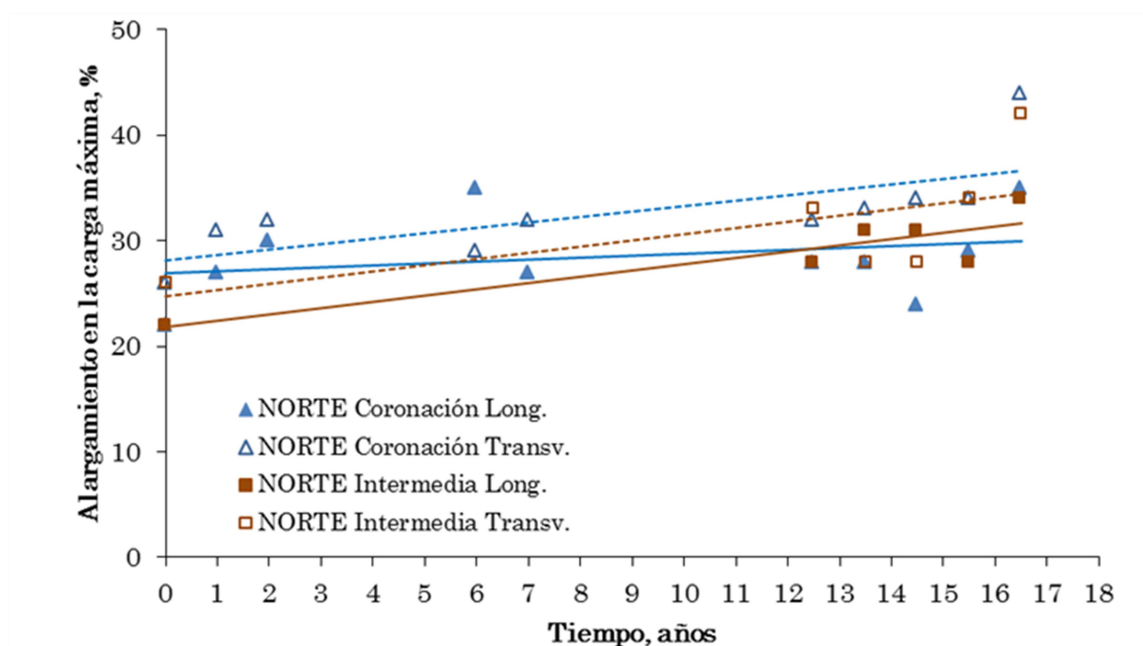


Figura 4.12. Evolución del alargamiento en el punto de carga máxima en el talud norte a lo largo del tiempo

El alargamiento en la carga máxima en el talud sur se expone en la Figura 4.13. El valor del alargamiento en la lámina antes de su instalación, en sentido longitudinal era de 22% obteniéndose unos valores de 38% y 35% en las zonas de coronación e intermedia, respectivamente, a los 16 años de la instalación de la geomembrana. En el sentido

transversal el valor inicial de 26% se transformó en un 47% en coronación y un 41% en la zona intermedia a los 16 años.

La evolución del alargamiento en el punto de carga máxima en el talud norte y sur de la balsa de El Saltadero muestra unos valores inferiores en el sentido longitudinal frente a los del sentido transversal debido al refuerzo de la geomembrana.

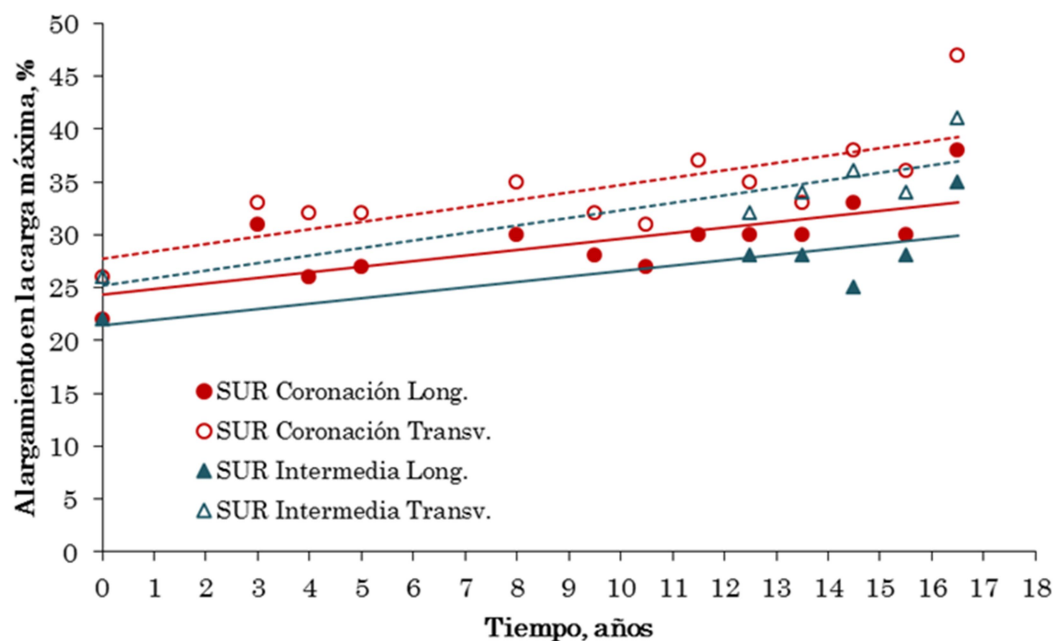


Figura 4.13. Evolución del alargamiento en el punto de carga máxima en el talud sur a lo largo del tiempo.

4.5.2.1. Resistencia al impacto estático

La resistencia al impacto estático o perforación se determinó según se describe en el capítulo 3 de Metodología Experimental, llevándose a cabo el ensayo en el sentido de compresión de la máquina universal.

Los datos obtenidos en la resistencia a la perforación en el talud norte se muestran en la Figura 4.14 observándose un incremento a lo largo de los años de instalación de la geomembrana. La determinación de la resistencia a la perforación se ha realizado en las dos caras de la geomembrana. Se observa una tendencia creciente en las dos zonas del talud norte. El valor inicial en la cara externa fue de 415 N/mm pasando a 715 N/mm y 624

N/mm en coronación y zona intermedia, respectivamente, a los 16 años de la puesta en obra de la geomembrana. El dato original de la cara interna era de 388 N/mm convirtiéndose en 554 N/mm en coronación y 402 N/mm en la zona intermedia a los 16 años de la aplicación de la geomembrana polimérica.

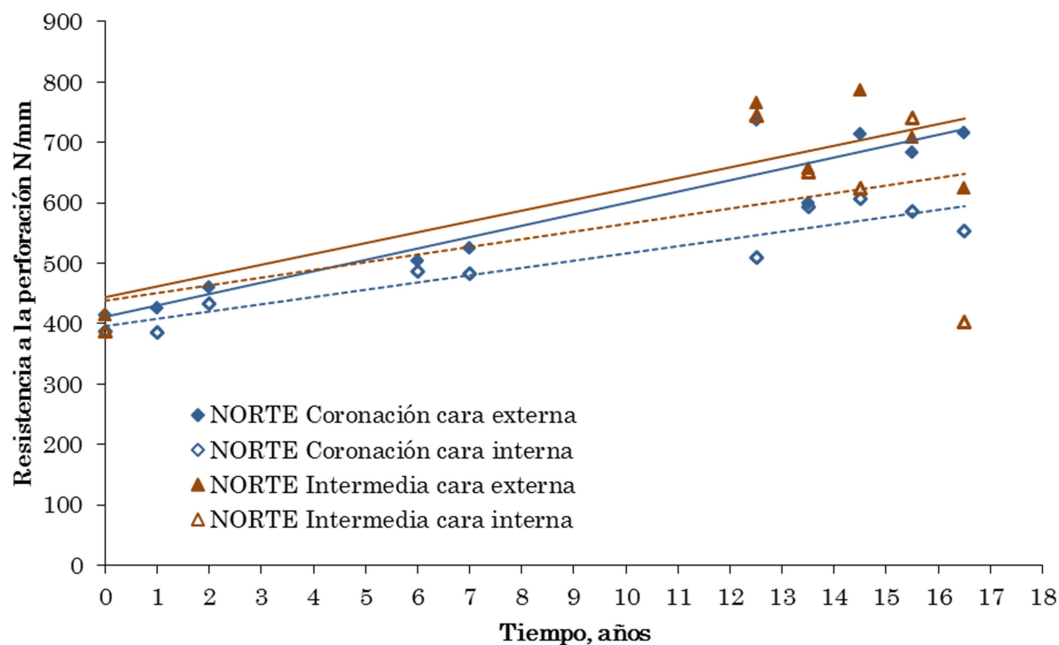


Figura 4.14. Evolución de la resistencia a la perforación en el talud norte a lo largo del tiempo.

Los datos de la resistencia a la perforación en el talud sur se muestran en la Figura 4.15 donde se observa un incremento de esta característica en la zona de coronación e intermedia. El valor inicial en la cara externa fue de 415 N/mm pasando a 587 N/mm y 345 N/mm en coronación y zona intermedia, respectivamente, a los 16 años. Originalmente, el cálculo de esta característica condujo a un valor de 388 N/mm que pasa a 649 N/mm en coronación y 411 N/mm en la zona intermedia a los 16 años transcurridos desde su instalación en el embalse.

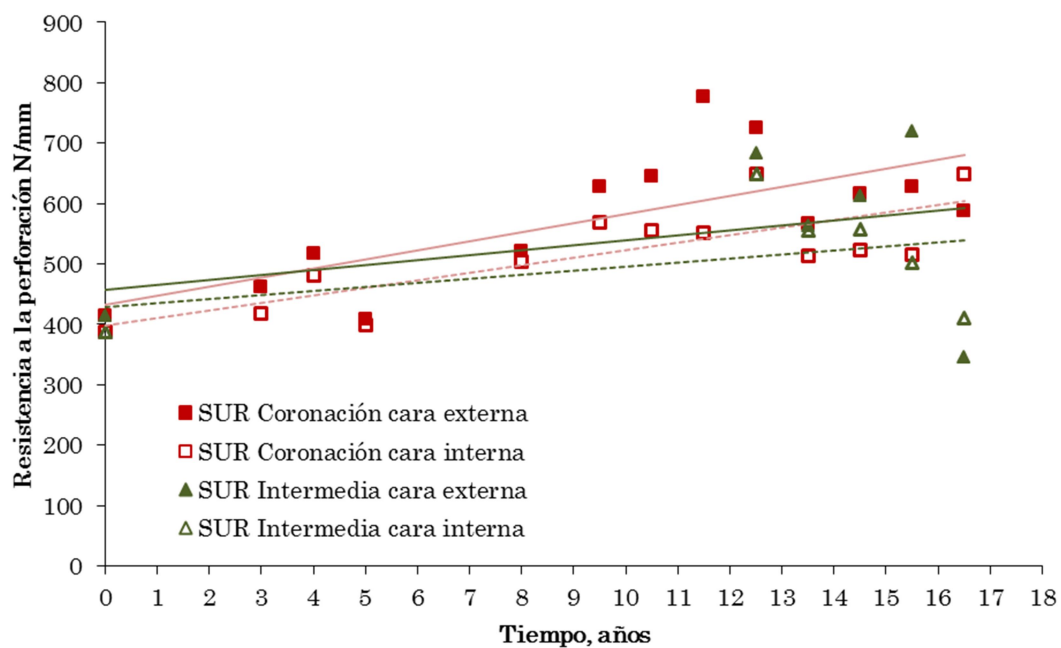


Figura 4.15. Evolución de la resistencia a la perforación en el talud sur a lo largo del tiempo.

Observando los datos en conjunto, se aprecia que los obtenidos en la cara externa son ligeramente superiores a los de la cara interna tanto en el talud norte como en el sur. También puede apreciarse que los datos de resistencia a la perforación a los 16 años han experimentado una disminución acusada en los dos taludes.

Los datos del recorrido del punzón en el talud norte experimentan una tendencia decreciente a lo largo del tiempo (Figura 4.16). El citado recorrido pasa de 18 mm, inicialmente, en la cara externa a 13 mm tanto en coronación como en la zona intermedia a los 16 años. Análogamente, en la cara interna se parte de 17 mm alcanzando un valor de 6 mm tanto en coronación como en la zona intermedia.

La evolución del recorrido del punzón en el talud sur muestra una tendencia decreciente a lo largo del tiempo (Figura 4.17).

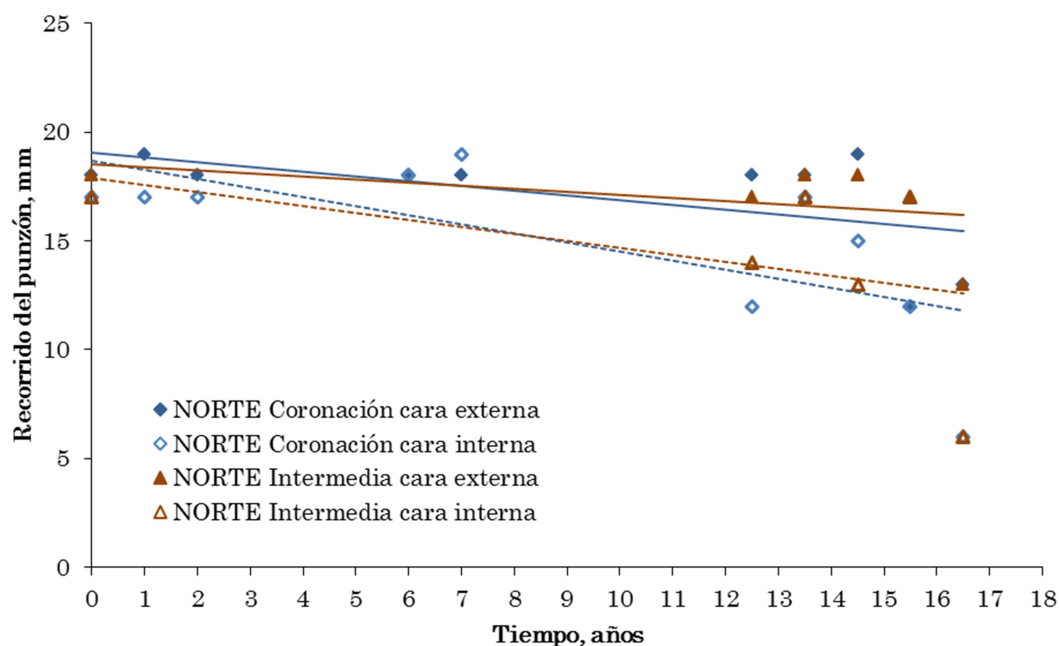


Figura 4.16. Evolución del recorrido del punzón en el talud norte a lo largo del tiempo.

Inicialmente, el recorrido del punzón en la cara externa es de 18 mm alcanzándose un valor de 9 mm y 5 mm en coronación y zona intermedia, respectivamente, a los 16 años de la puesta en obra. El recorrido inicial en la cara interna es de 17 mm obteniéndose un valor de 15 mm y 8 mm en las zonas de coronación e intermedia, respectivamente.

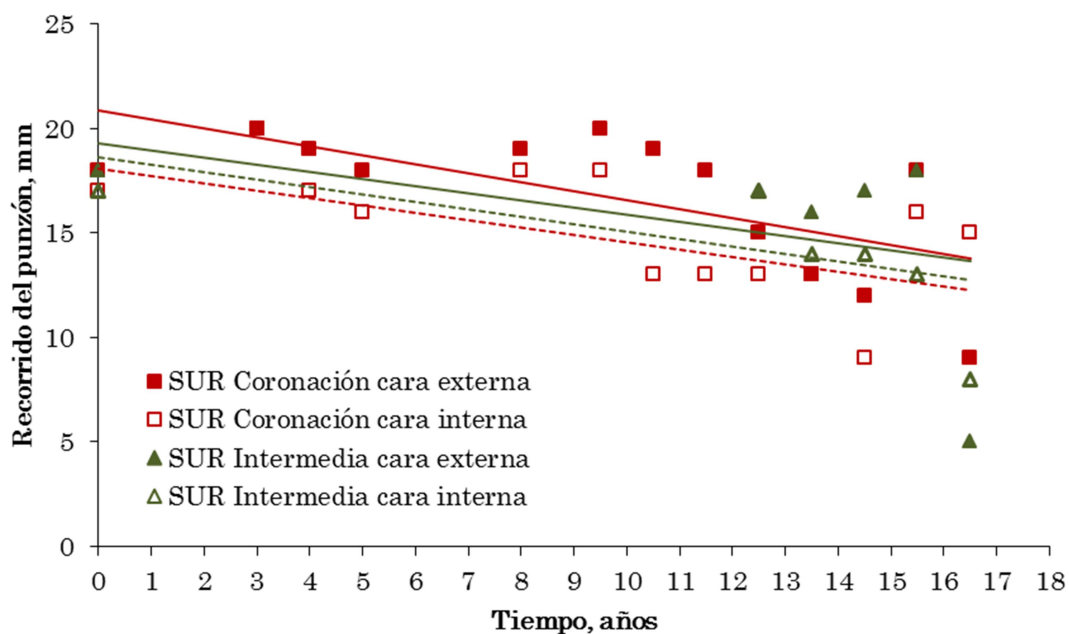


Figura 4.17. Evolución del recorrido del punzón en el talud sur a lo largo del tiempo.

El recorrido del punzón evoluciona de forma similar en los dos taludes de la geomembrana de la balsa de El Saltadero. Se aprecia igualmente que los datos experimentan una disminución acusada a los 16 años de la puesta en obra de la geomembrana.

4.5.2.3. Resistencia de la soldadura

Los datos obtenidos en la determinación de la resistencia de la soldadura por el método de tracción y pelado en el talud norte se muestran en la Figura 4.18. Se observa que la resistencia de la soldadura por el método de tracción experimenta una tendencia creciente. El valor inicial de resistencia de la soldadura es de 1239 N/50mm, aumentando a lo largo del tiempo hasta llegar al valor de 1427 N/50mm a los 16 años de instalación de la geomembrana.

En el caso de la resistencia de la soldadura por el método del pelado se observa una tendencia decreciente a lo largo del tiempo. La carga inicial en el talud norte es de 561 N/50mm alcanzándose un valor de 142 N/50mm a los 15 años.

El comportamiento de la soldadura en el talud sur es similar a los del talud norte. Los datos experimentan una tendencia creciente a lo largo del tiempo en la resistencia de la soldadura por tracción y una tendencia decreciente en los valores de la resistencia de la soldadura por pelado (Figura 4.19). Inicialmente el valor de la resistencia de la soldadura por tracción es de 1239 N/50mm obteniéndose un valor de 1443 N/50mm a los 16 años. En el caso de la resistencia de la soldadura por pelado estos valores evolucionan desde 561 N/50mm hasta 187 N/50mm a los 16 años de la instalación de la geomembrana.

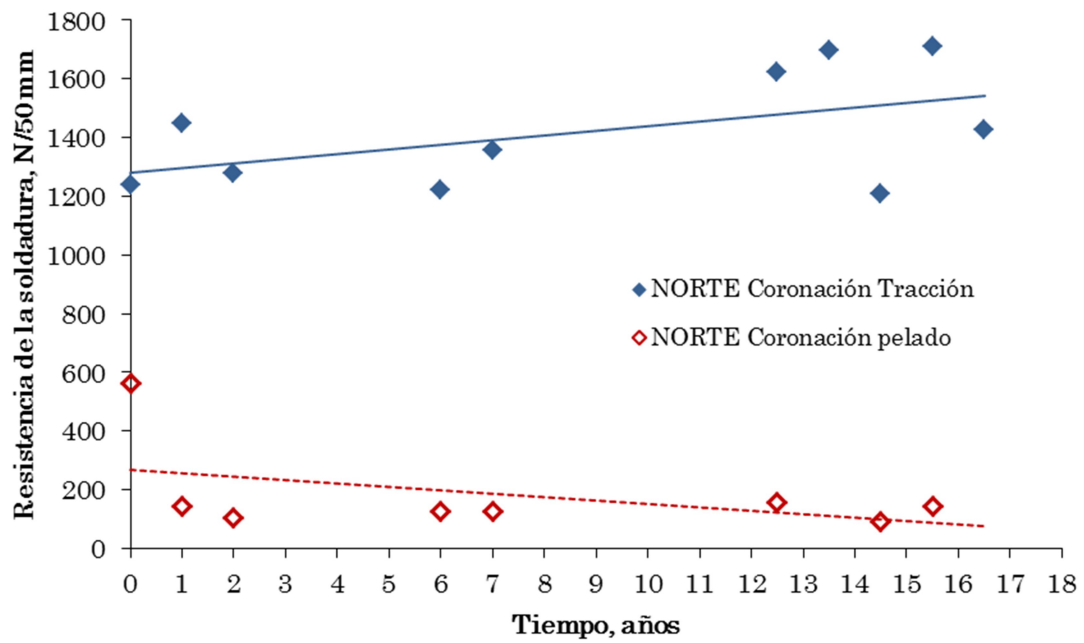


Figura 4.18. Evolución de la resistencia de la soldadura por tracción y pelado en las muestras del talud norte coronación.

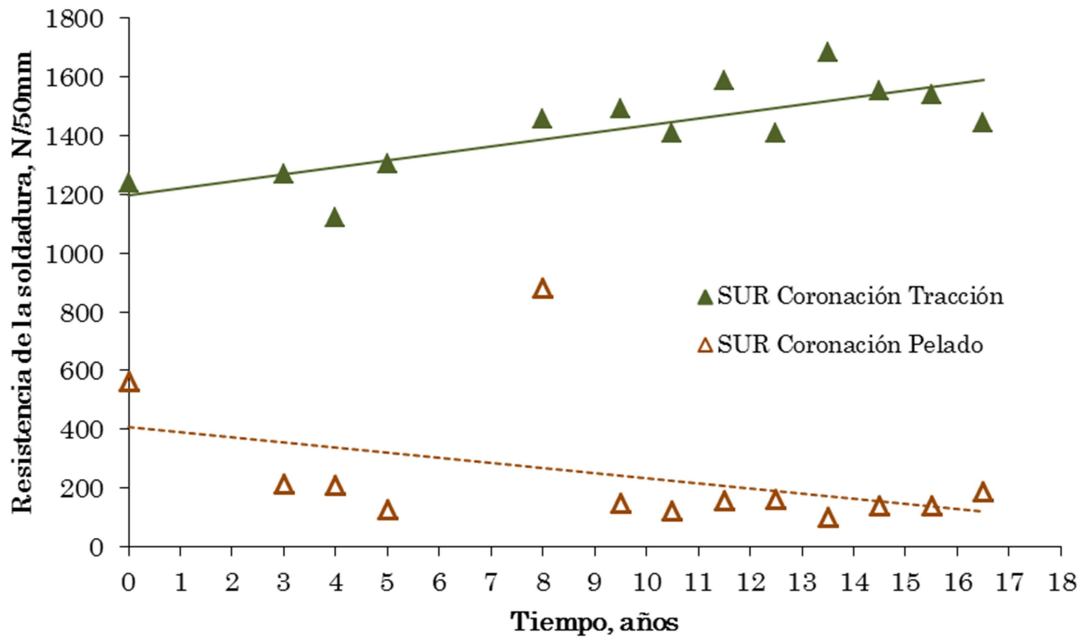


Figura 4.19. Evolución de la resistencia de la soldadura por tracción y pelado en las muestras del talud sur coronación.

4.5.3. CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS

4.5.3.1. Microscopia óptica de reflexión

La Figura 4.20 muestra las microfotografías tomadas a 60x en la zona de coronación del talud norte tanto por la cara externa como la interna de la geomembrana. El estudio se ha llevado a cabo en el material extraído a los 7, 13 y 16 años de la instalación de la geomembrana. En ellas se observa una superficie homogénea sin alteraciones superficiales apreciables.

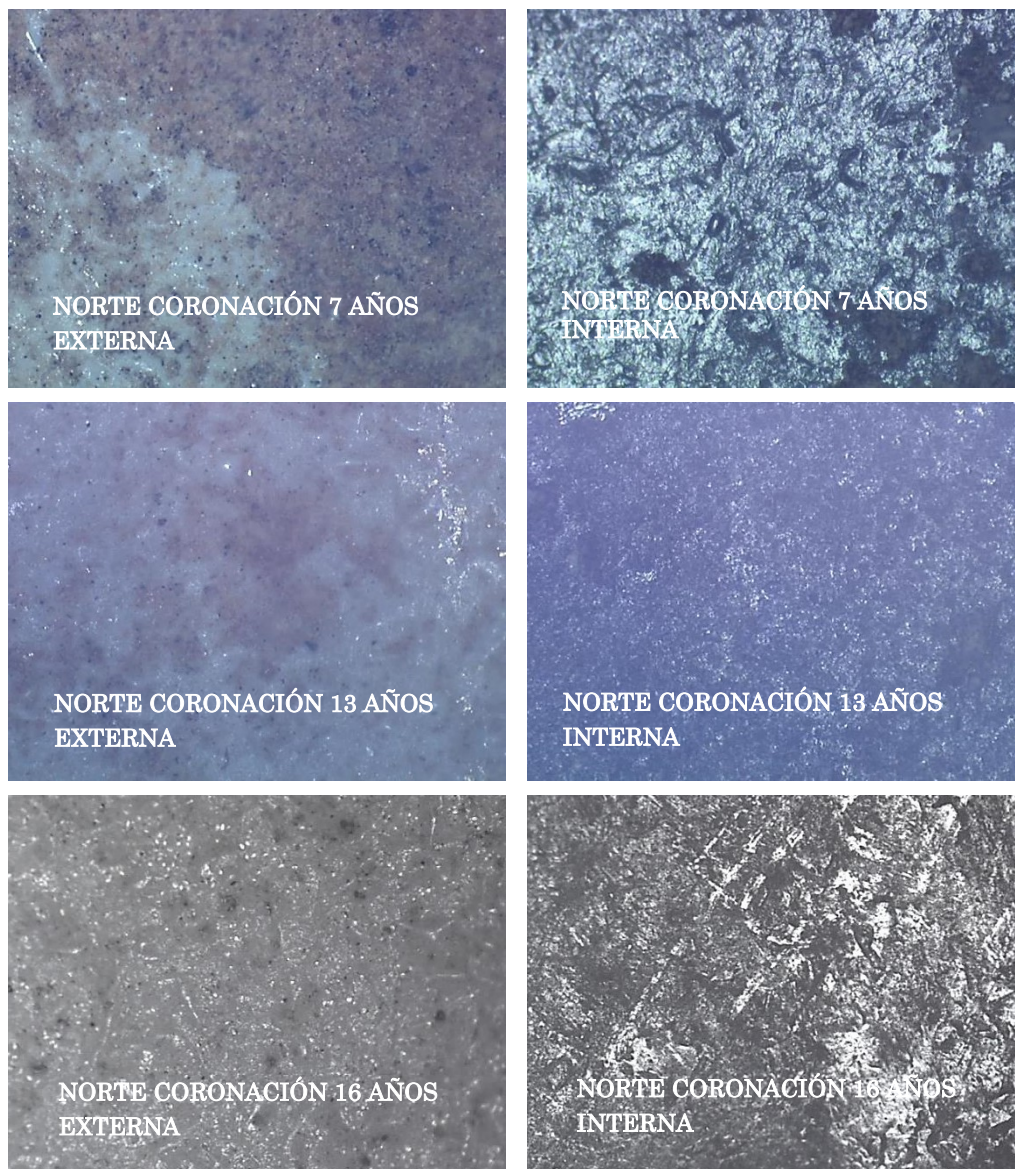


Figura 4.20. Microfotografías de MOR a 60x del talud norte coronación a diferentes años de instalación de la geomembrana.

En la Figura 4.21 se exponen las microfotografías tomadas a 60x de las muestras extraídas de la zona de coronación del talud sur a diferentes años de instalación de la geomembrana. En este caso no se pudieron extraer muestras a los 7 años, por este motivo se exponen las muestras más cercanas en el tiempo a las del talud norte, en los primeros años de la puesta en servicio de la geomembrana.

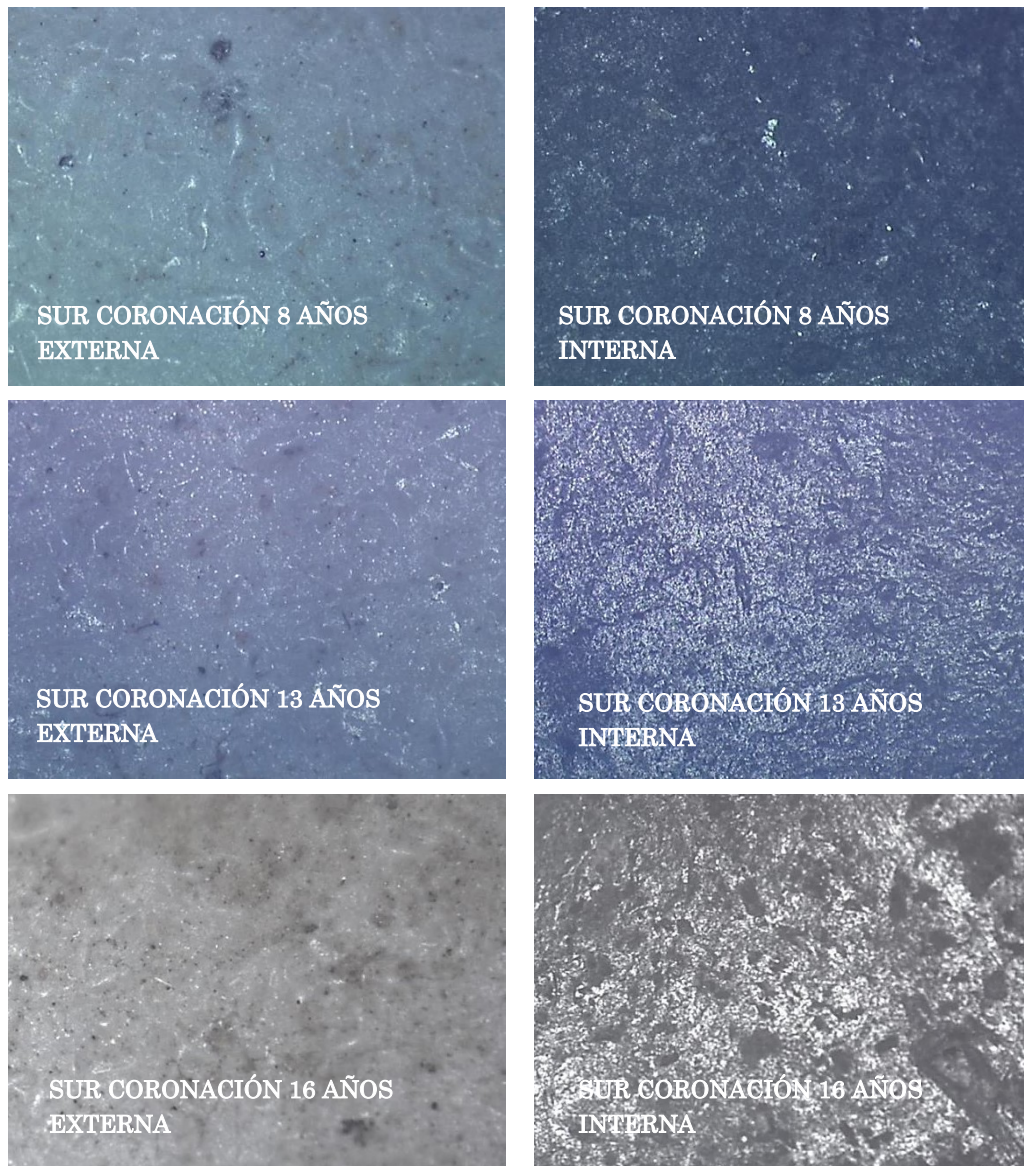


Figura 4.21. Microfotografías MOR a 60x del talud sur coronación a diferentes años de instalación de la geomembrana.

Las microfotografías de microscopía óptica del talud sur no presentan alteraciones superficiales apreciables en ninguna de las caras, observándose una superficie homogénea en toda la superficie de la geomembrana.

El estudio de las muestras extraídas a diferentes profundidades en la balsa de El Saltadero, mediante microscopía óptica de reflexión, no muestra alteraciones superficiales ni síntomas de degradación, por lo que se ha optado por no añadirlas en esta memoria.

4.5.3.2. Microscopía electrónica de barrido

a) Talud norte coronación, zona intermedia y fondo

La Figura 4.22 presenta las microfotografías realizadas en el estudio mediante microscopía electrónica a 90x en la zona de coronación del talud norte de la balsa de El Saltadero. Las muestras de la zona de coronación del talud norte se han extraído a los 7, 13 y 16 años de su instalación. El estudio microscópico se ha realizado en las dos caras de la geomembrana.

Las microfotografías indican que en la cara externa de la geomembrana se observan descamaciones y deposiciones de material sólido que proceden del agua de la balsa. En cambio no se aprecian microfisuras ni microgrietas en toda la superficie de la geomembrana.

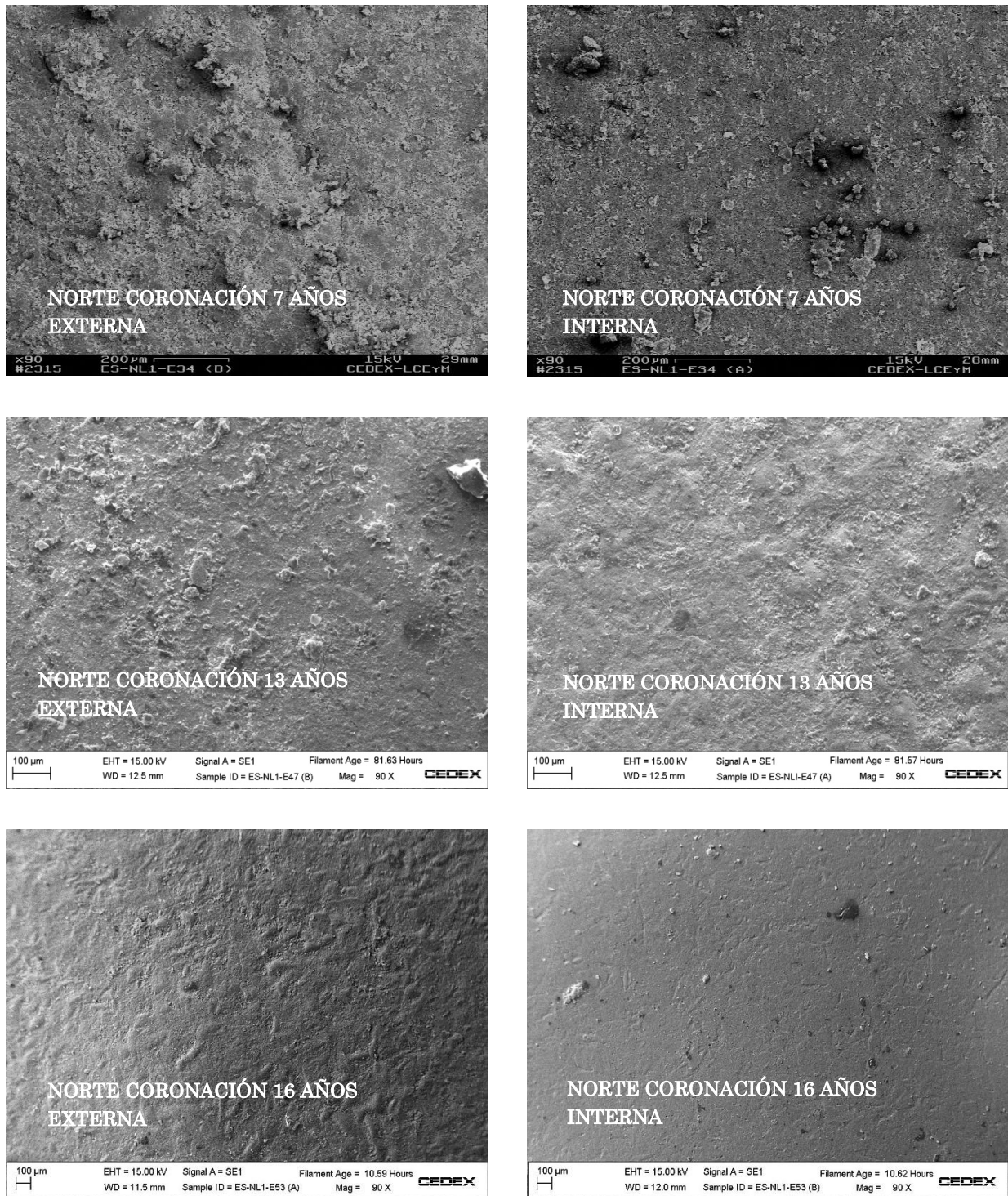


Figura 4.22. Microfotografías de MEB a 90x del talud norte coronación a diferentes años de instalación de la geomembrana.

En la Figura 4.23 se pueden ver las microfotografías realizadas a 900x en la zona de coronación del talud norte. Las microfotografías realizadas en la cara externa a los 7 años de instalación de la geomembrana, presentan descamaciones y oquedades no observándose fisuras ni grietas.

Las microfotografías realizadas a los 13 años detectan microfisuras y microgrietas en la cara externa. También se observan oquedades y microporos en toda la superficie de la geomembrana. En la cara interna no han detectado microgrietas ni microfisuras, sin embargo si presenta gran cantidad de oquedades en su superficie.

En el material de la zona de coronación del talud norte, extraído a los 16 años, aparecen deposiciones de material sólido así como restos de frústulas que proceden de una variedad de microalgas denominadas diatomeas. La frústula es la pared celular de la capa externa de la diatomea y está compuesta casi en su totalidad por sílice (Noval 2015). En la cara interna, se detectan una gran cantidad de microporos extendidos en toda la superficie de la geomembrana.

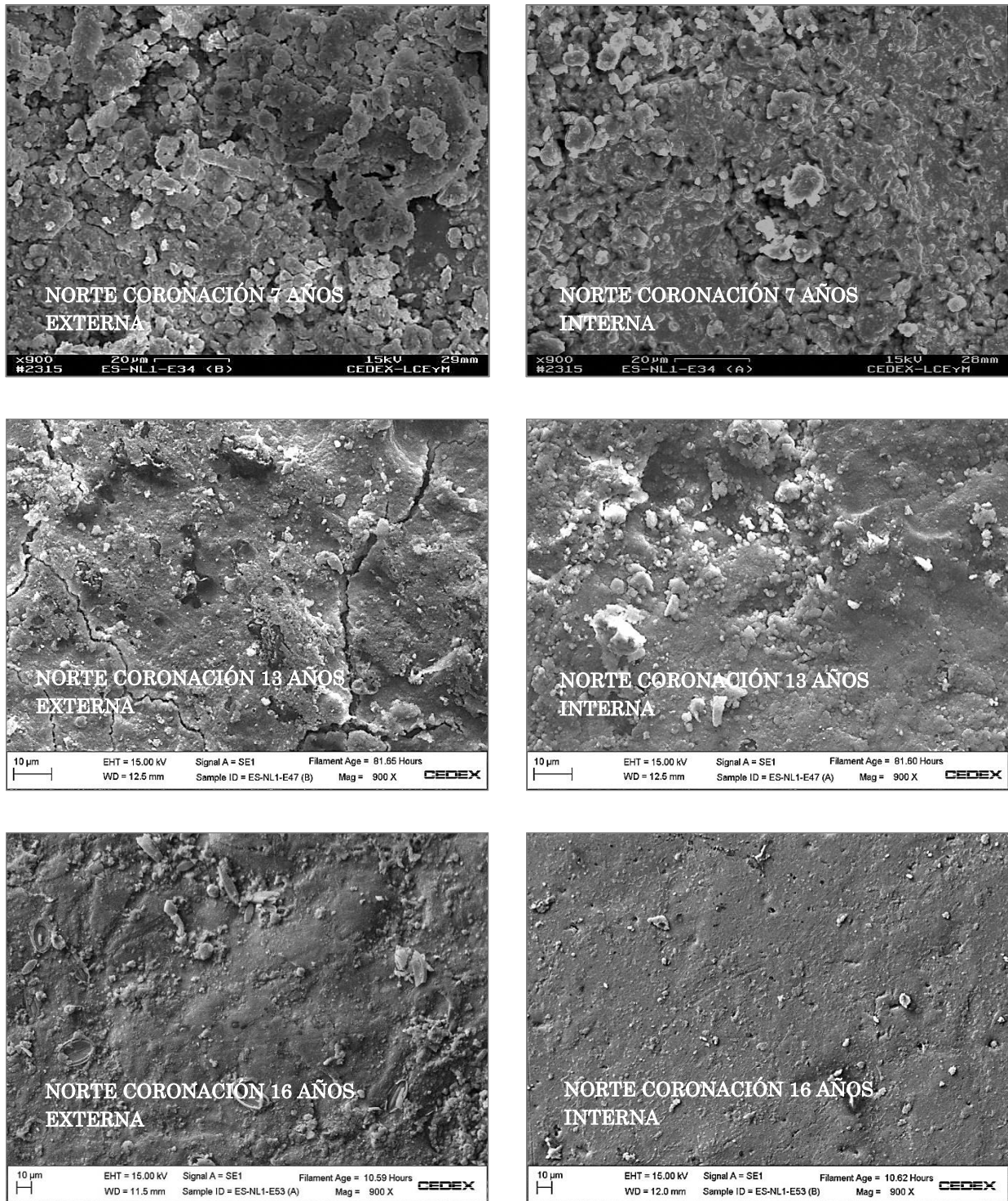


Figura 4.23. Microfotografías de MEB a 900x del talud norte coronación a diferentes años de instalación de la geomembrana.

En la Figura 4.24 se exponen las microfotografías realizadas a 90x correspondientes a la zona intermedia del talud norte a los 13 y 16 años de su instalación. En esta zona de la geomembrana se puede apreciar ciertas descamaciones, oquedades y microporos tanto en la cara externa como en la interna.

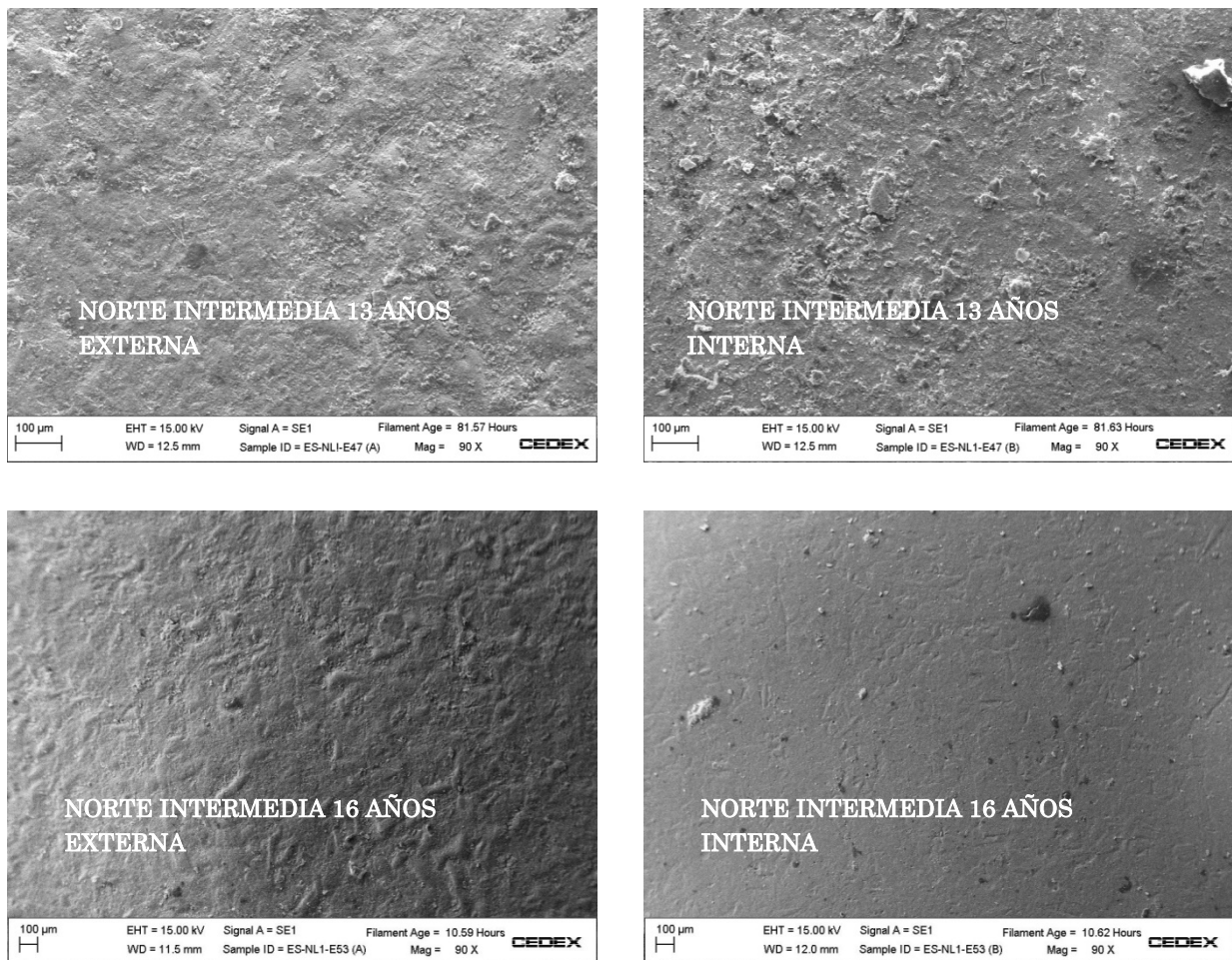


Figura 4.24. Microfotografías de MEB a 90x del talud norte, zona intermedia, a diferentes años de instalación de la geomembrana.

Las microfotografías a 900x muestran con mayor detalle las descamaciones y oquedades en la zona intermedia de la geomembrana del talud norte (Figura 4.25). Se observa la presencia de microorganismos en el material extraído a los 16 años de su puesta en obra.

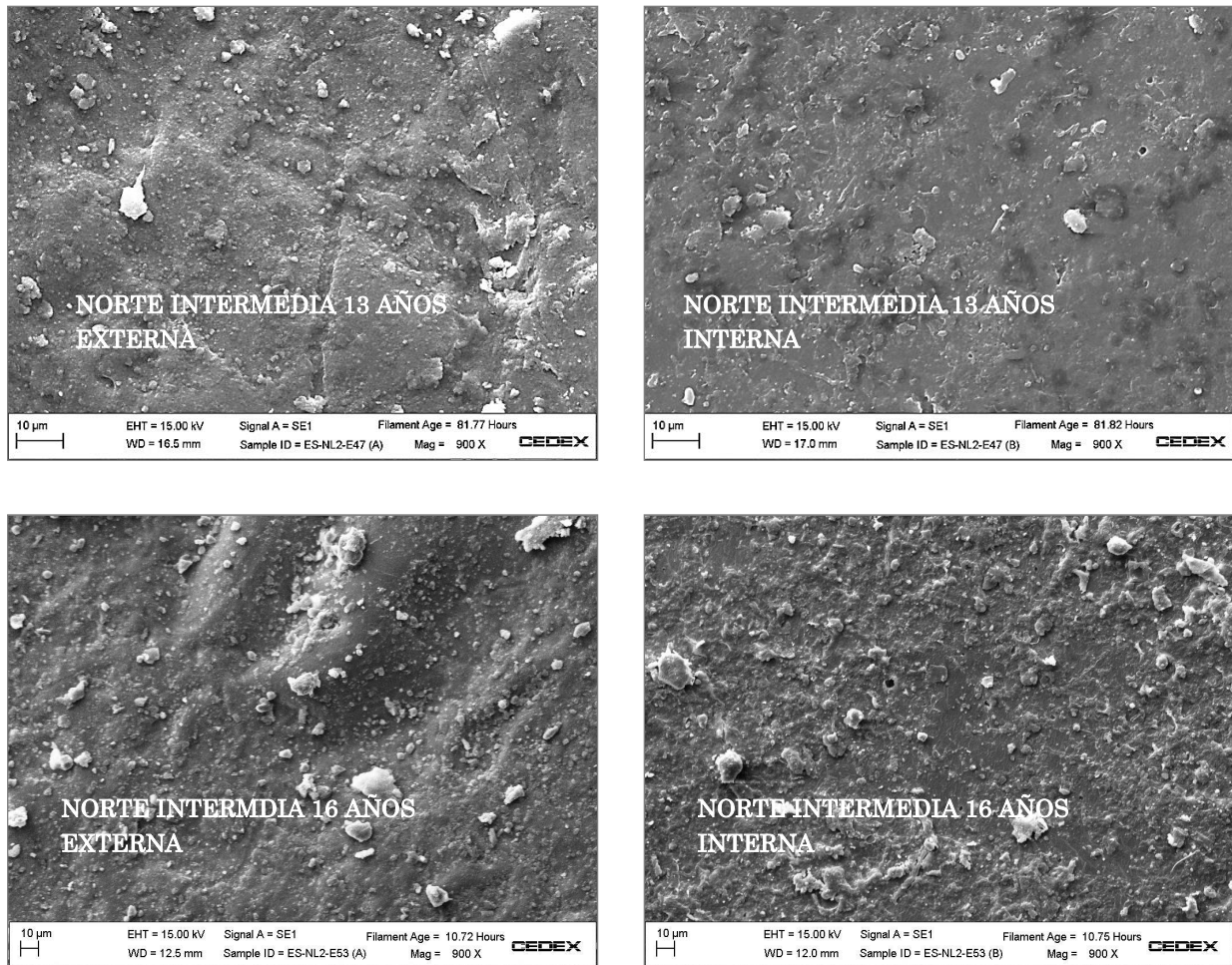


Figura 4.25. Microfotografías de MEB 900x del talud norte, zona intermedia, a diferentes años de instalación de la geomembrana.

Las microfotografías de las Figuras 4.26 y 4.27 se han realizado a 90x y 900x mostrando el aspecto del fondo de la geomembrana a los 13 años de su instalación. Las microfotografías de la cara externa indican la existencia de numerosas microfisuras y microgrietas que se aprecian con mayor detalle en la imagen tomada a 900x. El fondo de la balsa siempre está cubierto de agua y aislado de las radiaciones solares, sin embargo se observa como la geomembrana experimenta el deterioro progresivo con el paso del tiempo.

La cara interna de la muestra extraída del fondo presenta oquedades y microporos así como restos de distintos materiales debido al contacto de la geomembrana con el terreno.

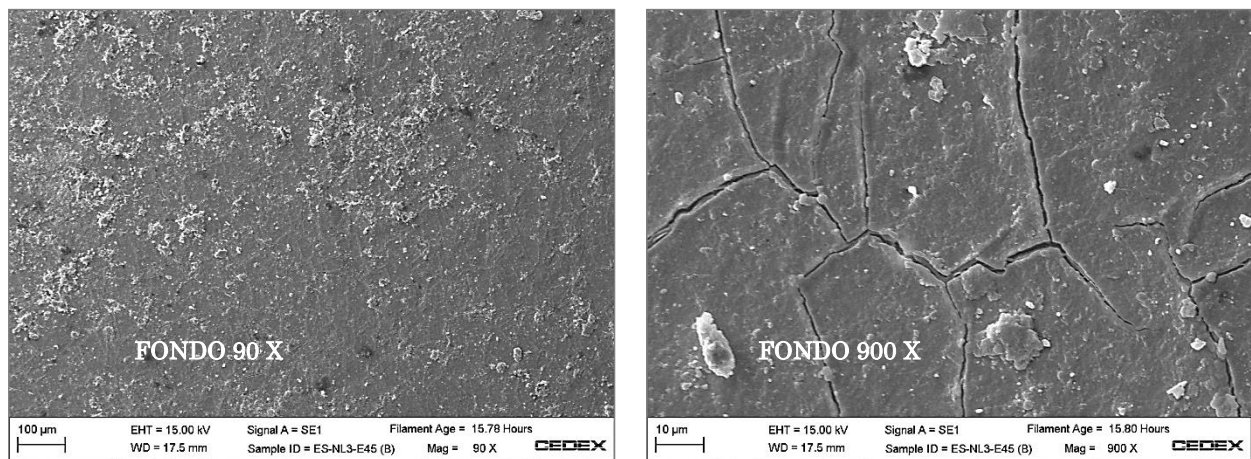


Figura 4.26. Microfotografías MEB de la muestra extraída del fondo a los 13 años de su instalación. Cara externa.

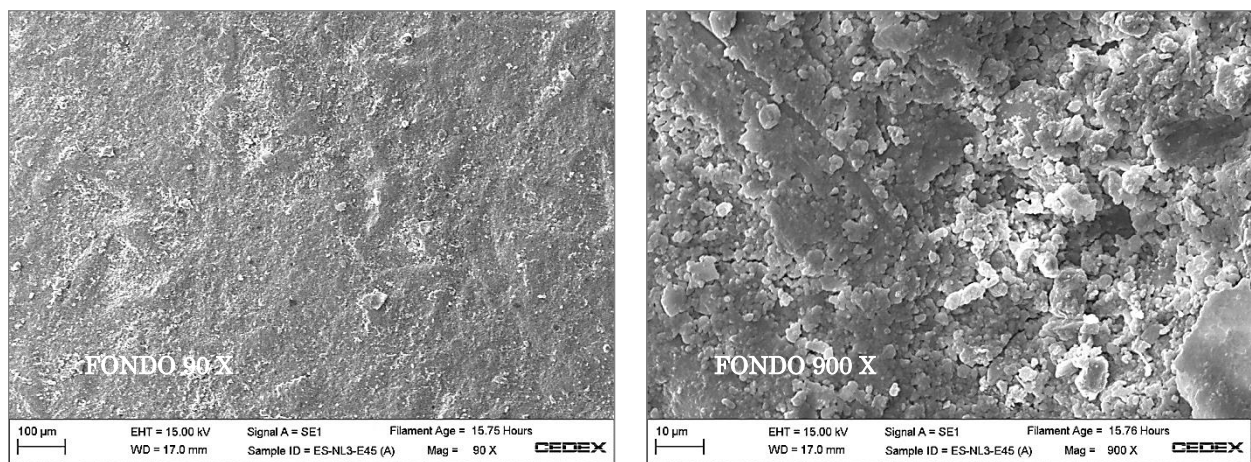


Figura 4.27. Microfotografías MEB de la muestra extraída del fondo a los 7 años de su instalación. Cara interna.

b) Talud sur coronación y zona intermedia

El estudio microscópico en el talud sur se ha realizado en las muestras extraídas a los 8, 13 y 16 años de aplicación de la geomembrana. En la Figura 4.28 se presentan las microfotografías obtenidas a 90x de las muestras de la zona de coronación del talud sur tanto en la cara externa como la interna de la geomembrana. En las microfotografías se observa una superficie homogénea y uniforme apreciándose algunos microporos aislados.

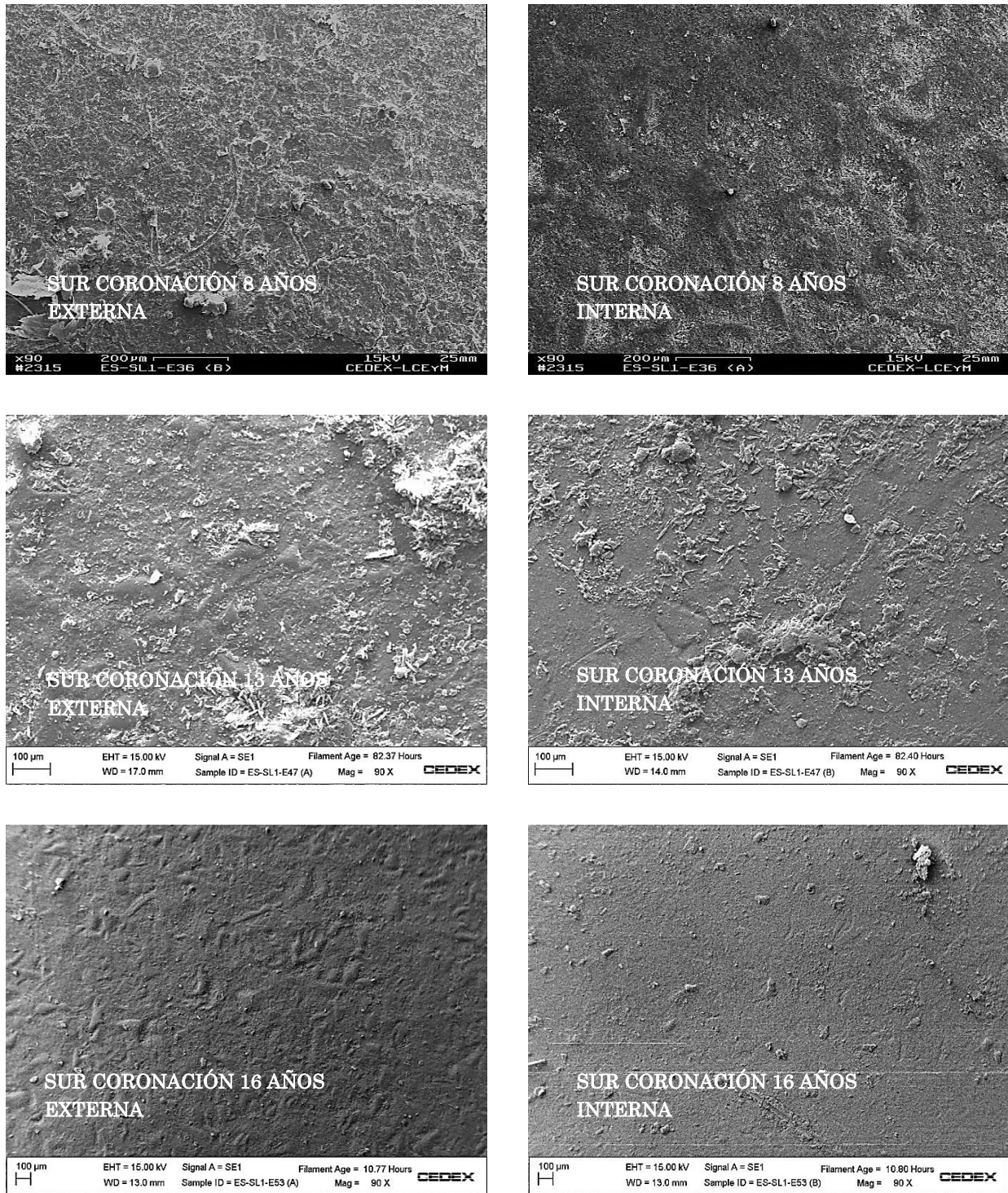


Figura 4.28. Microfotografías de MEB a 90x del talud sur coronación a diferentes años de instalación de la geomembrana.

En la Figura 4.29 se muestran las microfotografías de la zona de coronación del talud sur obtenidas a 900x. Se puede apreciar como a los 8 años de instalación la geomembrana presenta un ligero cuarteamiento en la superficie externa. En la microfotografía correspondiente a los 13 años se observa la superficie de la geomembrana con una elevada cantidad de diatomeas. Se puede apreciar con detalle el agrupamiento de diatomeas en el centro de la imagen. A los 16 años se observa una superficie homogénea con presencia de microporos y descamaciones del material polimérico.

La cara interna de la geomembrana no muestra microgrietas ni microfisuras destacables en las imágenes tomadas a los 8, 13 y 16 años de su instalación. Sin embargo sí presenta numerosos restos de microorganismos y deposiciones de material del terreno, como se puede ver en las microfotografías obtenidas a los 8 y 13 años de la puesta en obra de la geomembrana.

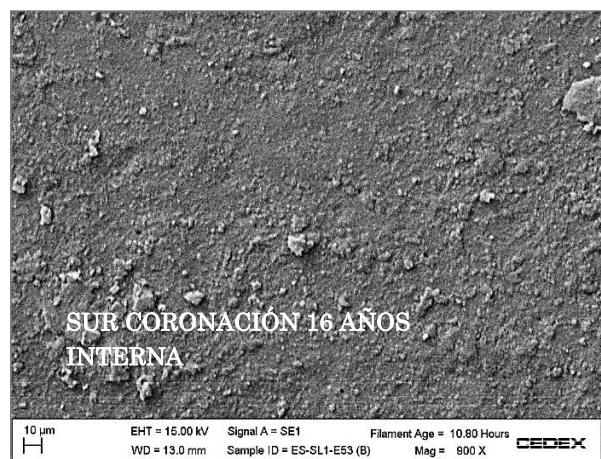
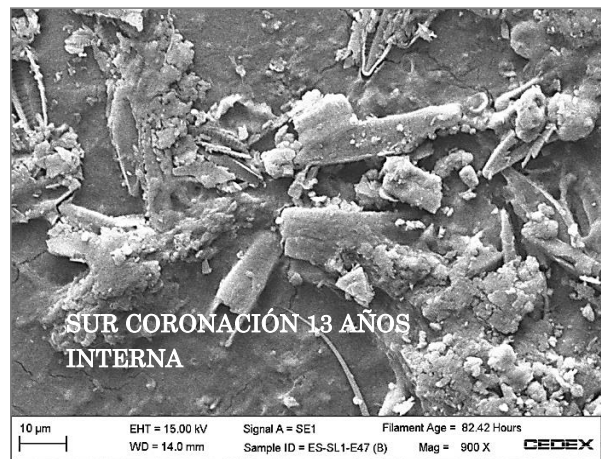
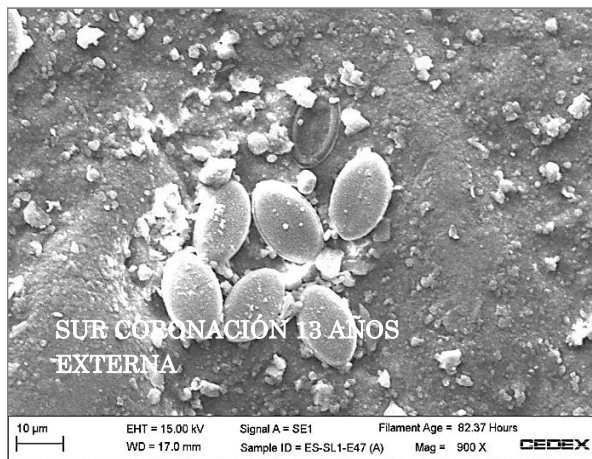
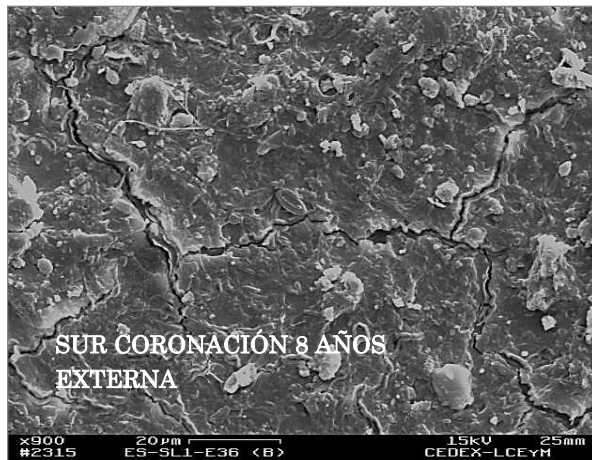


Figura 4.29. Microfotografías de MEB a 900x del talud sur coronación a diferentes años de instalación de la geomembrana.

La Figura 4.30 presenta el conjunto de microfotografías tomadas a 90x en las muestras extraídas de la zona intermedia del talud sur de la geomembrana instalada en la balsa de El Saltadero a los 13 y 16 años de su instalación. Se observa una superficie homogénea en el material tanto en su cara externa como en la interna.

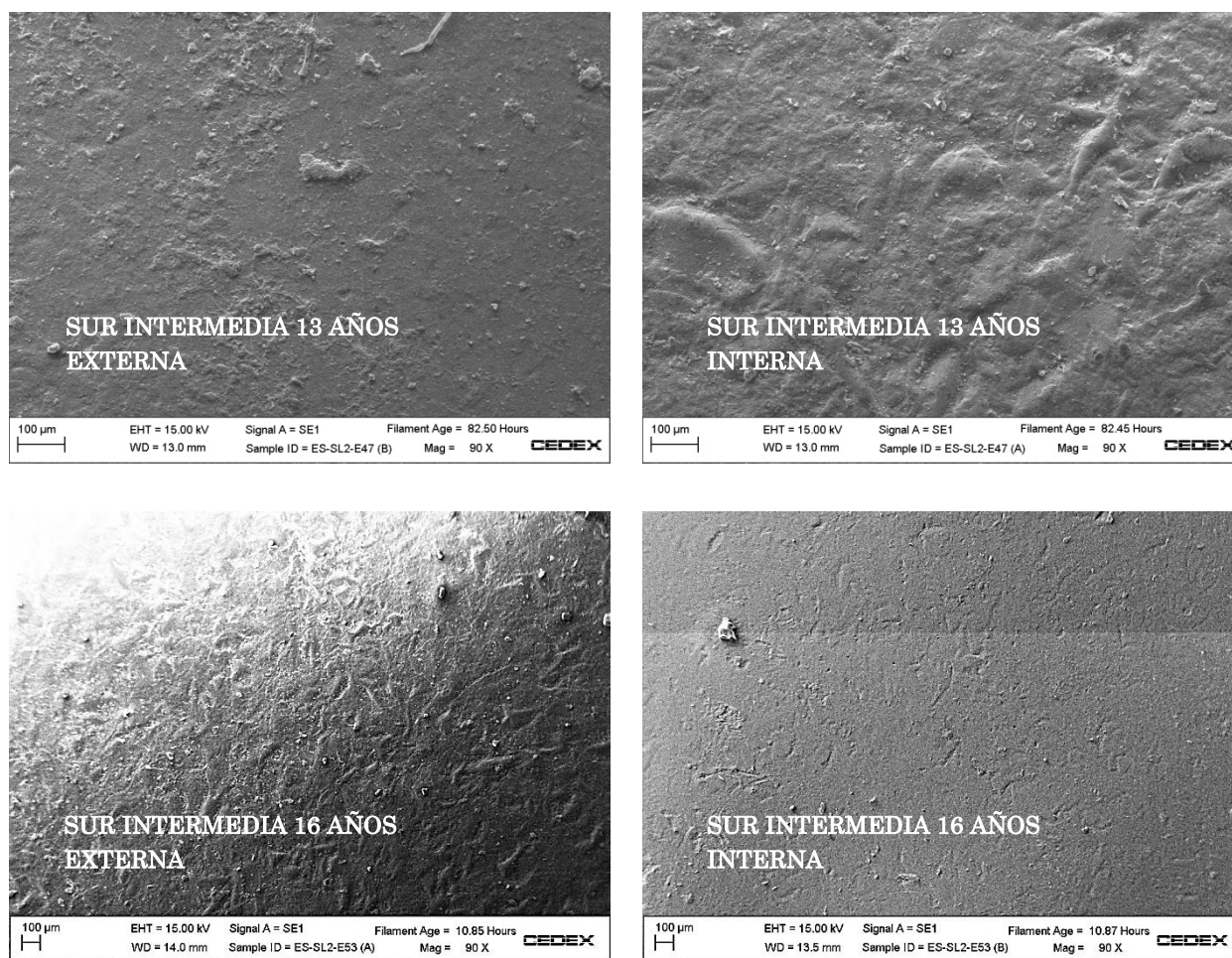


Figura 4.30. Microfotografías de MEB a 90x del talud sur zona intermedia a los 13 y 16 años de instalación de la geomembrana.

En la Figura 4.31 se observan las microfotografías tomadas en los materiales extraídos en la zona intermedia del talud sur a 900x. En estas microfotografías se aprecian con mayor detalle la presencia de microfisuras, microgrietas y microporos en la cara externa de la geomembrana. La cara interna muestra una superficie más homogénea con algunos microporos aislados.

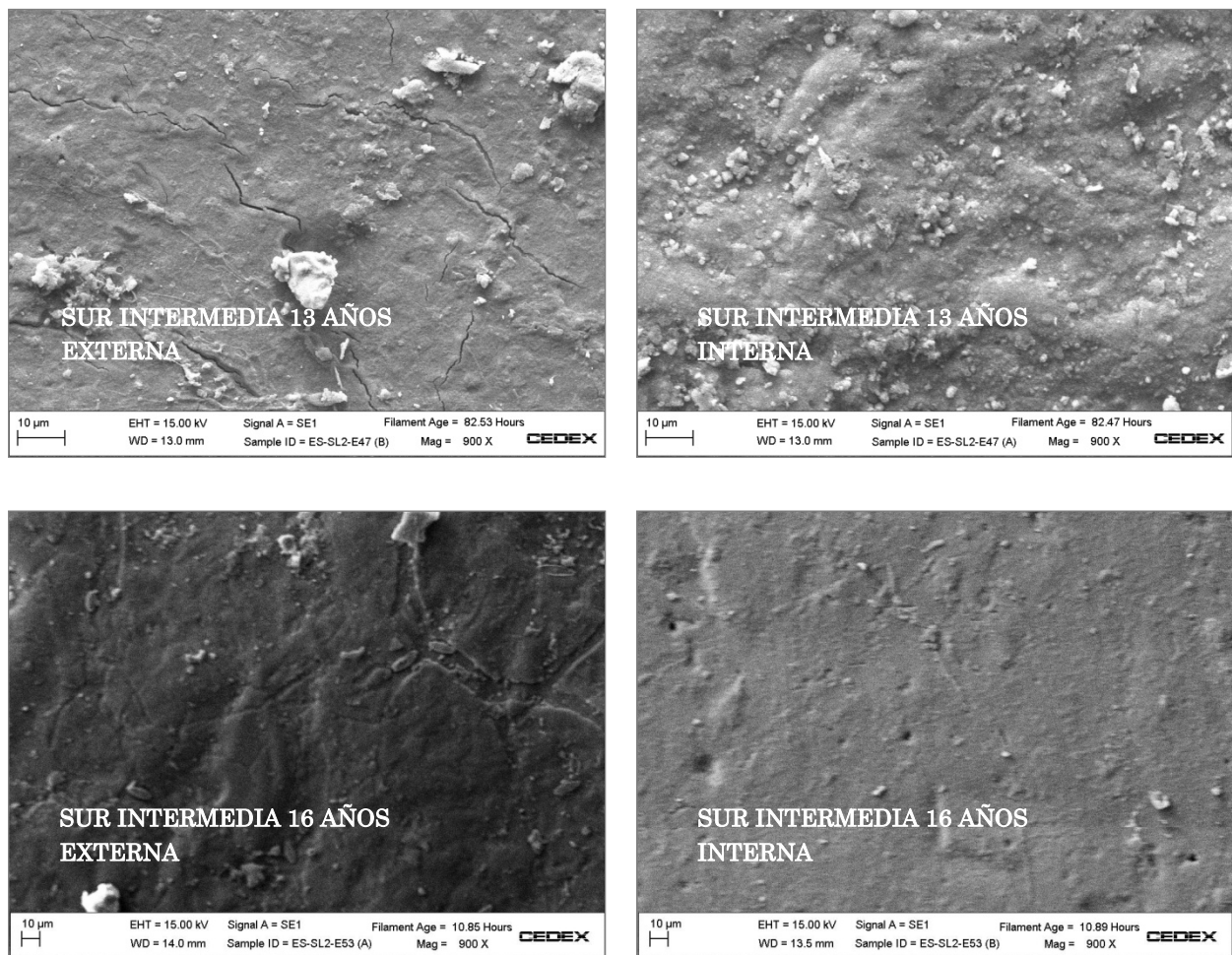


Figura 4.31. Microfotografías de MEB 900x del talud sur zona intermedia a los 13 y 16 años de instalación de la geomembrana.

4.5.4. TÉCNICAS INSTRUMENTALES

En este epígrafe se expondrán los resultados obtenidos en la caracterización del plastificante mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (IR-TF) y cromatografía de gases (CG) acoplada con espectrometría de masas (EM). Mediante la técnica de IR-TF se conseguirá determinar los grupos funcionales presentes en la molécula del plastificante que forma parte de la geomembrana de PVC-P.

Los resultados proporcionados por la cromatografía de gases y espectrometría de masas darán lugar a la determinación de la estructura molecular de los plastificantes y del peso molecular de dichos aditivos.

4.5.4.1. Determinación de los grupos funcionales de los plastificantes por espectroscopia infrarroja

La determinación del espectro de infrarrojo por transformada de Fourier se llevó a cabo según el procedimiento descrito en el capítulo 3 de Metodología Experimental. En la Tabla 4.7 se exponen las longitudes de onda características de los ftalatos de alquilo. Las bandas de absorción del espectro determinado correspondieron a ésteres aromáticos de ftalatos de alquilo. La estructura general de los ftalatos de alquilo se representa en la Figura 4.32.

Tabla 4.7. Longitudes de onda características de los ftalatos de alquilo.

Longitud de onda, cm^{-1}	Grupo funcional
3080	Vibración de tensión C-H aromático
2965 - 2875	Vibración de tensión de los grupos -CH ₃ y -CH ₂ -
1770	Vibración de tensión del grupo carbonilo -C=O
1600 - 1585	Vibración de esqueleto de -C=C- de anillo aromático
1130 - 1075	Vibraciones de tensión simétrica y asimétrica de -C-O-C
740	Vibración de flexión fuera del plano -C-H en la disustitución en posición orto en el anillo aromático.

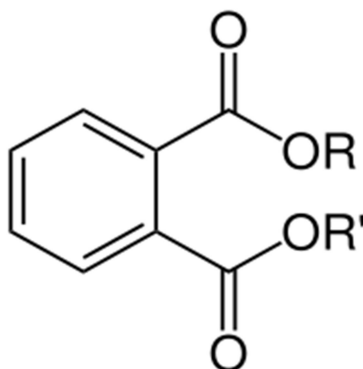


Figura 4.32. Estructura química general de los ftalatos de alquilo.

Los ftalatos son los ésteres dialquílicos o arílicos del ácido 1,2-bencenodicarboxílico; el nombre ftalato deriva de la nomenclatura tradicional de ácido ftálico. La síntesis de los ftalatos se realiza mediante la reacción entre el anhídrido ftálico con un alcohol de entre 6 y 13 átomos de carbono. Los radicales R y R' representan las cadenas alquílicas lineales o ramificadas correspondientes a los alcoholes.

4.5.4.2. Estudio de los plastificantes mediante cromatografía de gases acoplada con espectrometría de masas

La cromatografía de gases ofrece información acerca del número de compuestos presentes en una muestra así como la proporción en la que se encuentran. Esta detección se realiza en función del tiempo de retención del compuesto en la columna cromatográfica. La cromatografía de gases se complementa con la espectrometría de masas ya que mediante esta última técnica se puede determinar con exactitud la estructura química del plastificante que forma parte de la geomembrana de PVC-P.

La cromatografía de gases se llevó a cabo en el plastificante extraído de la muestra de geomembrana de PVC-P correspondiente a los 9 años de su instalación. El cromatograma obtenido, Figura 4.33, muestra la aparición de seis picos a tiempos de retención de 57.60, 83.56, 90.23, 96.37, 102.24 y 107.77 min., lo que indica la existencia de seis ésteres diferentes con los siguientes porcentajes 1.89%, 11.60%, 19.25%, 32.52%, 24.98% y 9.76% respectivamente.

El análisis de cada uno de compuestos obtenidos mediante espectrometría de masas dio lugar a espectros diferentes que se presentan a continuación, junto con los valores de masa molecular, las fragmentaciones y su intensidad relativa.

El primer pico del cromatograma a 57.60 min se presenta en la Figura 4.34.

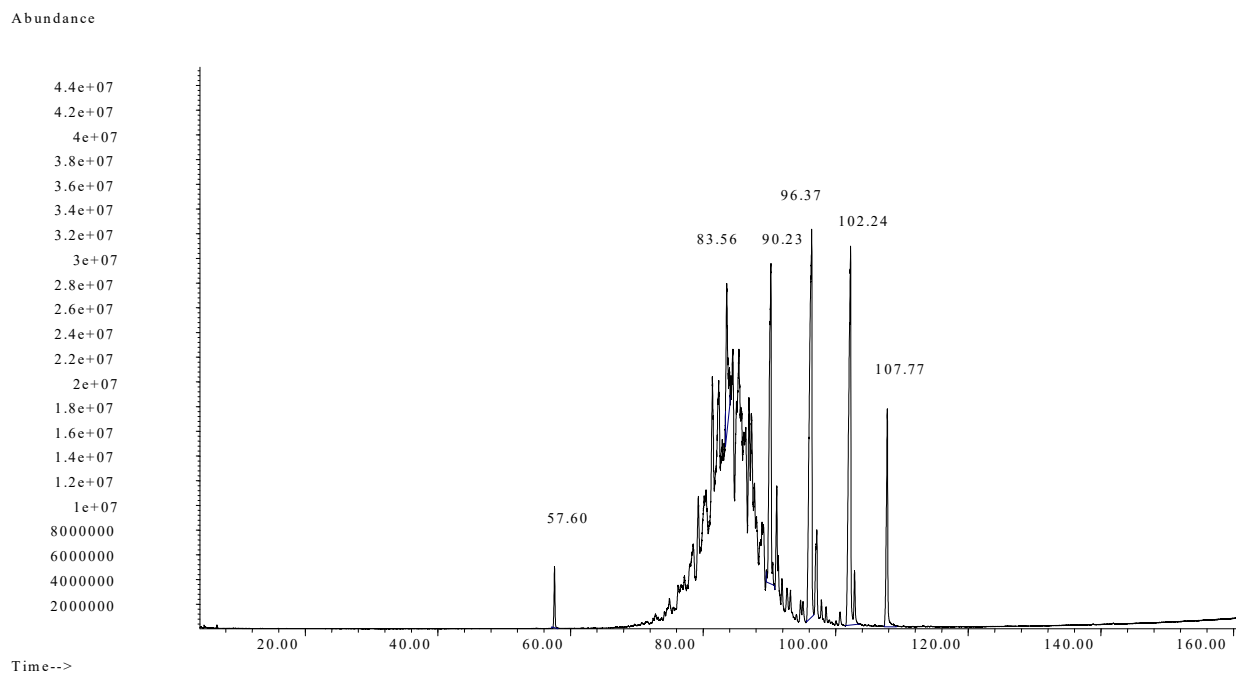


Figura 4.33. Cromatograma del plastificante de la geomembrana de PVC-P de la balsa de El Saltadero.

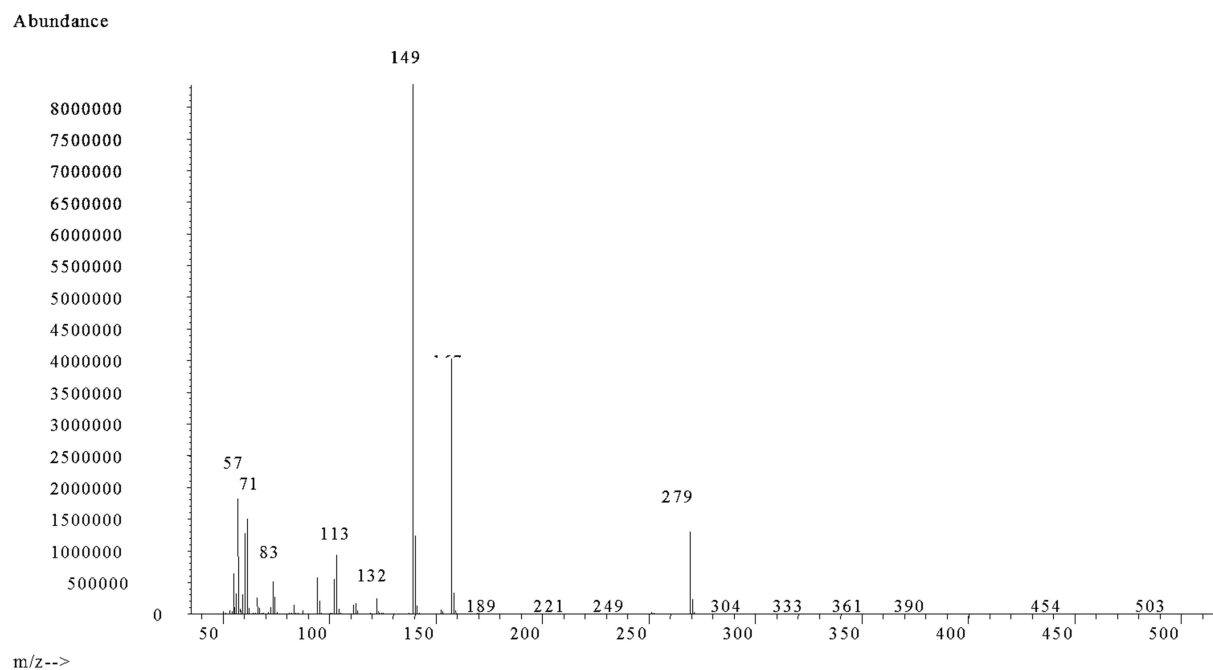


Figura 4.34. Espectro de masas del pico de retención a 57.60 min.

Las fragmentaciones indican que el compuesto es el ftalato de bis(2-etilhexilo). Su fórmula química es $C_{24}H_{38}O_4$ y su masa molecular es 390 g/mol (Tabla 4.8). Su estructura química es la que se muestra en la Figura 4.35.

Tabla 4.8. Fragmentaciones correspondientes al pico 57.60 min.

MS	Fragmentaciones	Intensidad relativa
279	$C_{16}H_{23}O_4^+$	12
167	$C_8H_7O_4^+$	39
149	$C_8H_5O_3^+$	100
113	$C_8H_{17}^+$	9
57	$C_4H_9^+$	18

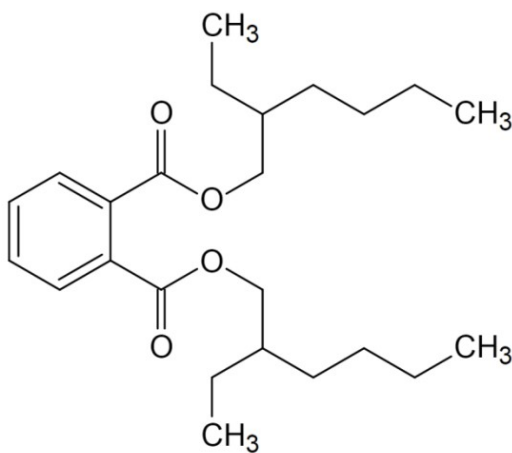


Figura 4.35. Estructura química del ftalato de bis (2-etilhexilo).

El análisis del segundo pico de retención a 83.56 min. dio lugar al espectro de masas de la Figura 4.36 y sus fragmentaciones se presentan que en la Tabla 4.9. Estos datos permitieron determinar el plastificante como el ftalato de diisodecilo. Su estructura química se muestra en la Figura 4.37, su fórmula química es $C_{28}H_{46}O_4$ y su masa molecular 446 g/mol.

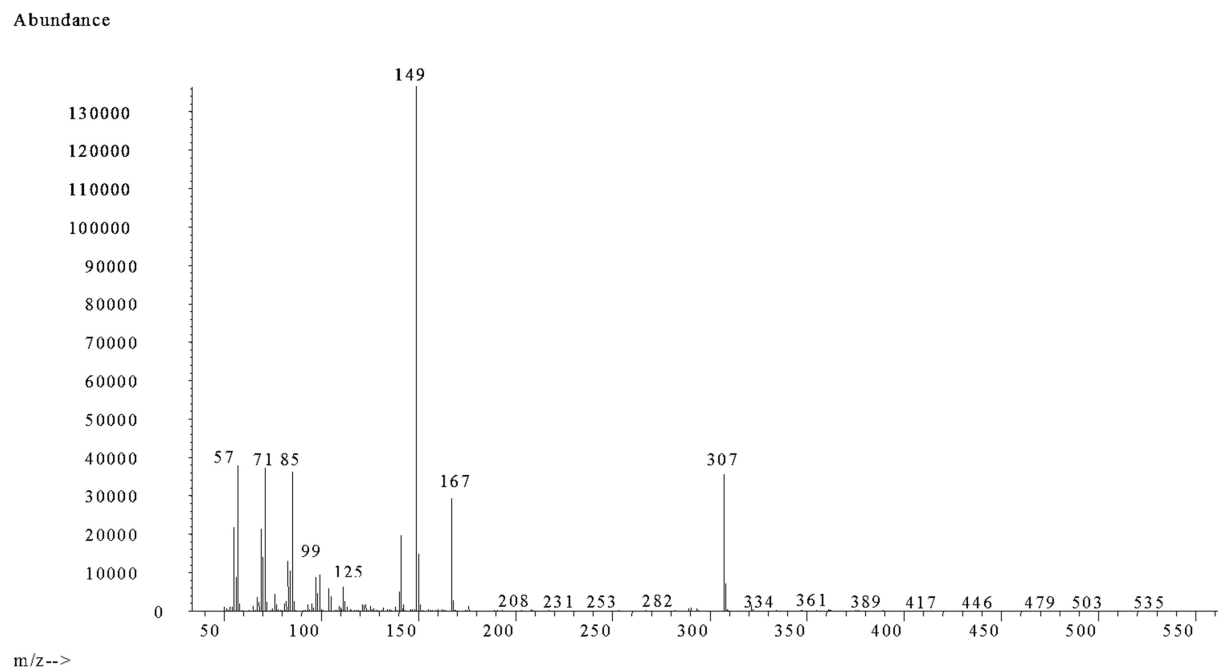


Figura 4.36. Espectro de masas del ftalato de diisodecilo.

Tabla 4.9. Fragmentaciones del pico de retención a 83.56 min.

MS	Fragmentaciones	Intensidad relativa
307	$C_{18}H_{27}O_4^+$	25
167	$C_8H_7O_4^+$	19
149	$C_8H_5O_3^+$	100
85	$C_6H_{13}^+$	25
57	$C_4H_9^+$	29

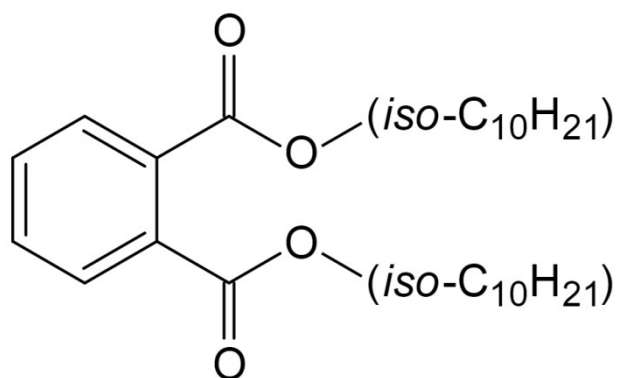


Figura 4.37. Estructura química del ftalato de diisodecilo.

El tercer pico de retención a 90.23 min. dio lugar al espectro de masas de la Figura 4.38 y a las fragmentaciones representadas en la Tabla 4.10. El análisis de los datos permitió determinar el plastificante como ftalato de isodecilnonilo. Su estructura química se muestra en la Figura 4.39, su fórmula química es $C_{27}H_{44}O_4$ y su masa molecular 432 g/mol.

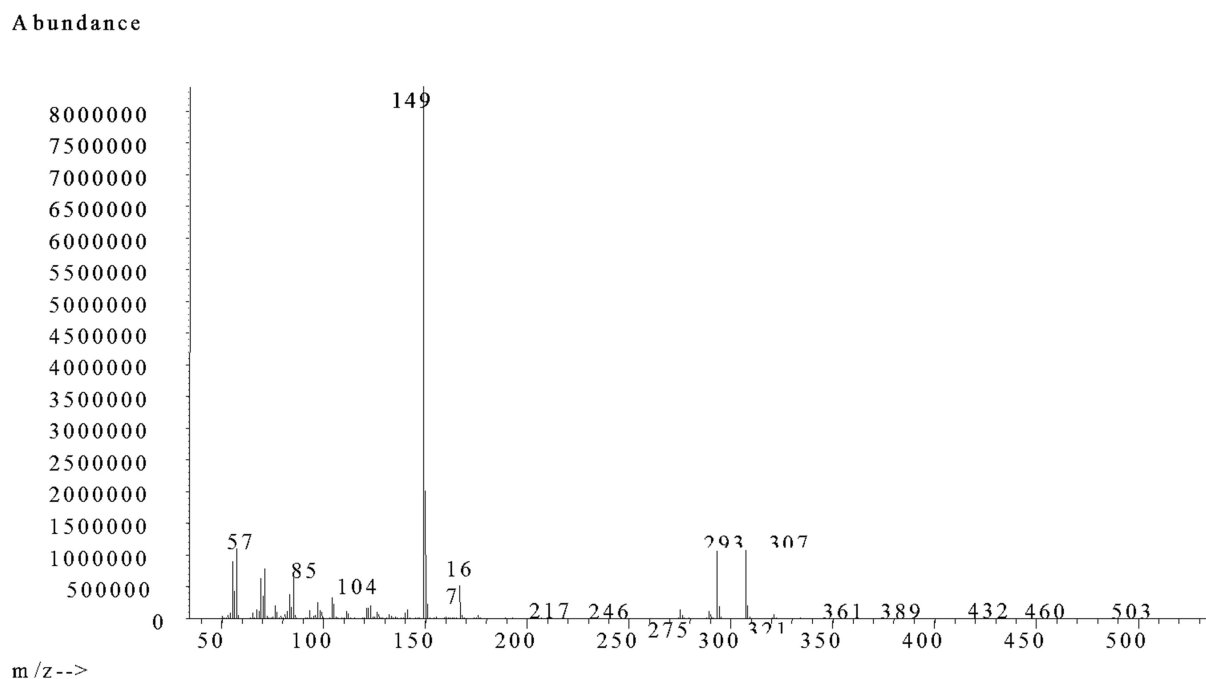


Figura 4.38. Espectro de masas del ftalato de isodecilnonilo.

Tabla 4.10. Fragmentaciones del pico de retención a 90.23 min.

MS	Fragmentaciones	Intensidad relativa
307	$C_{18}H_{27}O_4^+$	13
293	$C_{17}H_{25}O_4^+$	13
149	$C_8H_5O_3^+$	100
57	$C_4H_9^+$	13

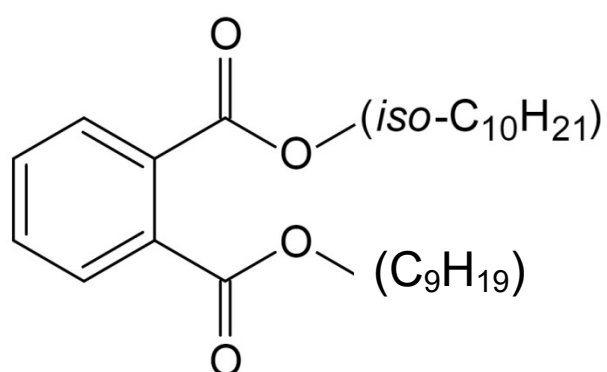


Figura 4.39. Estructura química del ftalato de isodecilnonilo.

El análisis del pico de retención a 96.37 min dio lugar al espectro de masas de la Figura 4.40 y a las fragmentaciones representadas en la Tabla 4.11. La información obtenida permitió determinar la estructura química del plastificante ftalato de didecilo, cuya fórmula es $C_{28}H_{46}O_4$ y su masa molecular 446 g/mol (Figura 4.41).

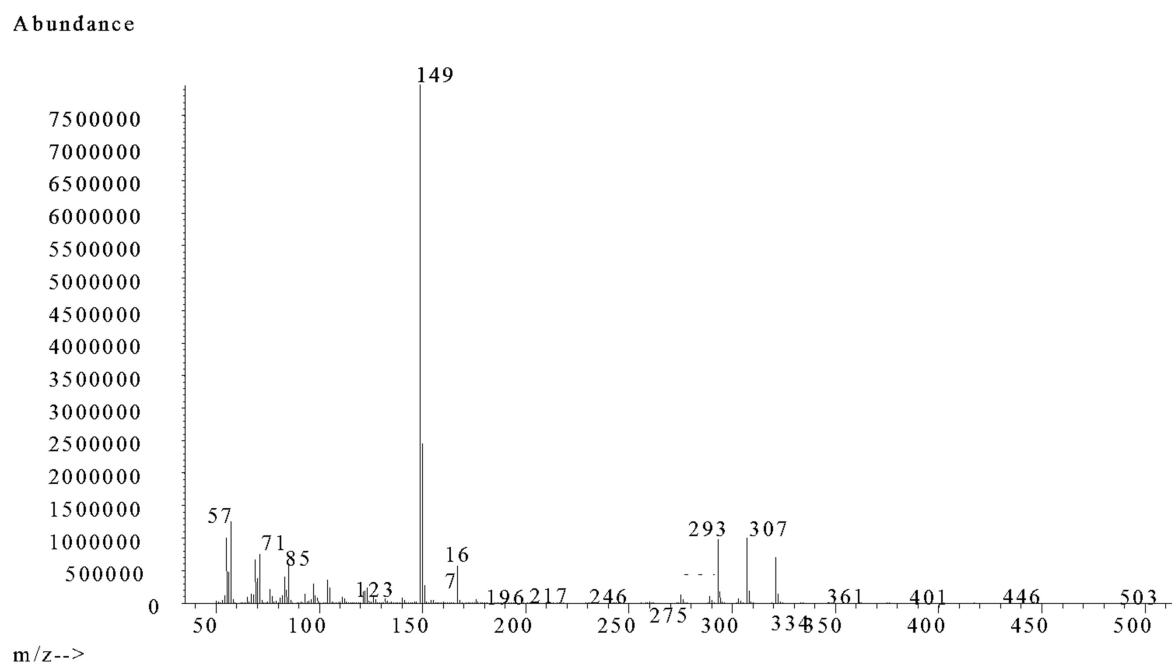


Figura 4.40. Espectro de masas del ftalato de didecilo.

Tabla 4.11. Fragmentaciones del pico de retención a 96.37 min.

MS	Fragmentaciones	Intensidad relativa
307	$C_{18}H_{27}O_4^+$	14
149	$C_8H_5O_3^+$	100
57	$C_4H_9^+$	14

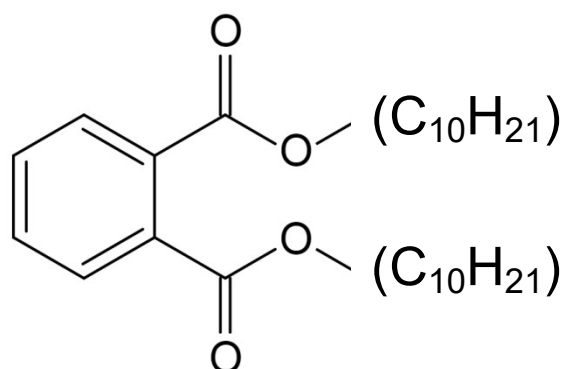


Figura 4.41. Estructura química del ftalato de didecilo

El pico de retención a 102.24 min proporcionó el espectro de masas de la Figura 4.42 junto con las fragmentaciones descritas en la Tabla 4.12. Los datos obtenidos permitieron determinar el quinto componente de la muestra de plastificante analizada que se identificó como ftalato de isodecilundecilo.

En la Figura 4.43 se representa la estructura química del plastificante cuya fórmula es $C_{29}H_{48}O_4$ y su masa molecular 460 g/mol.

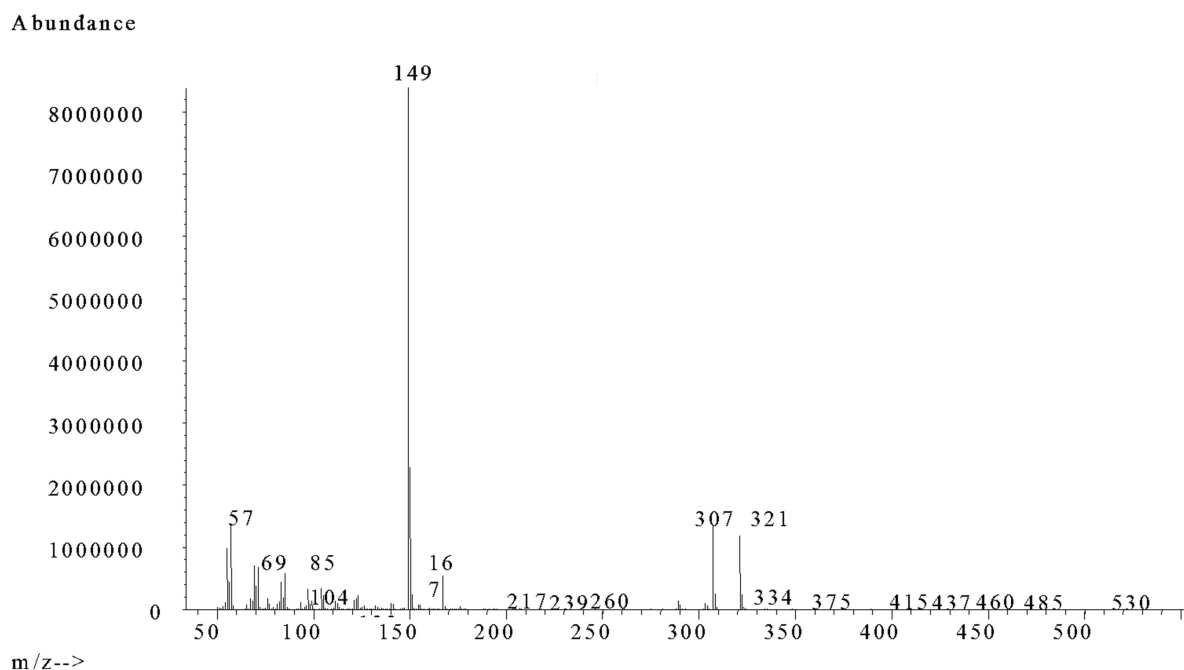


Figura 4.42. Espectro de masas del ftalato de isodecilundecilo.

Tabla 4.12. Fragmentaciones del pico de retención a 102.24 min.

MS	Fragmentaciones	Intensidad relativa
321	$C_{19}H_{29}O_4^+$	13
307	$C_{18}H_{27}O_4^+$	15
149	$C_8H_5O_3^+$	100
57	$C_4H_9^+$	15

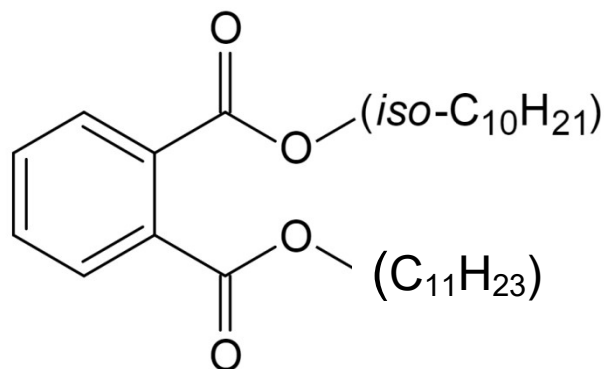


Figura 4.43. Estructura química del ftalato de isodecilundecilo.

Finalmente, el sexto y último pico de retención a 107.77 min dio lugar al espectro de masas representado en la Figura 4.44 y a las fragmentaciones mostradas en la Tabla 4.13. Esta información permitió determinar el plastificante como el ftalato de diundecilo con fórmula química $C_{30}H_{50}O_4$ y masa molecular 474 g/mol (Figura 4.45).

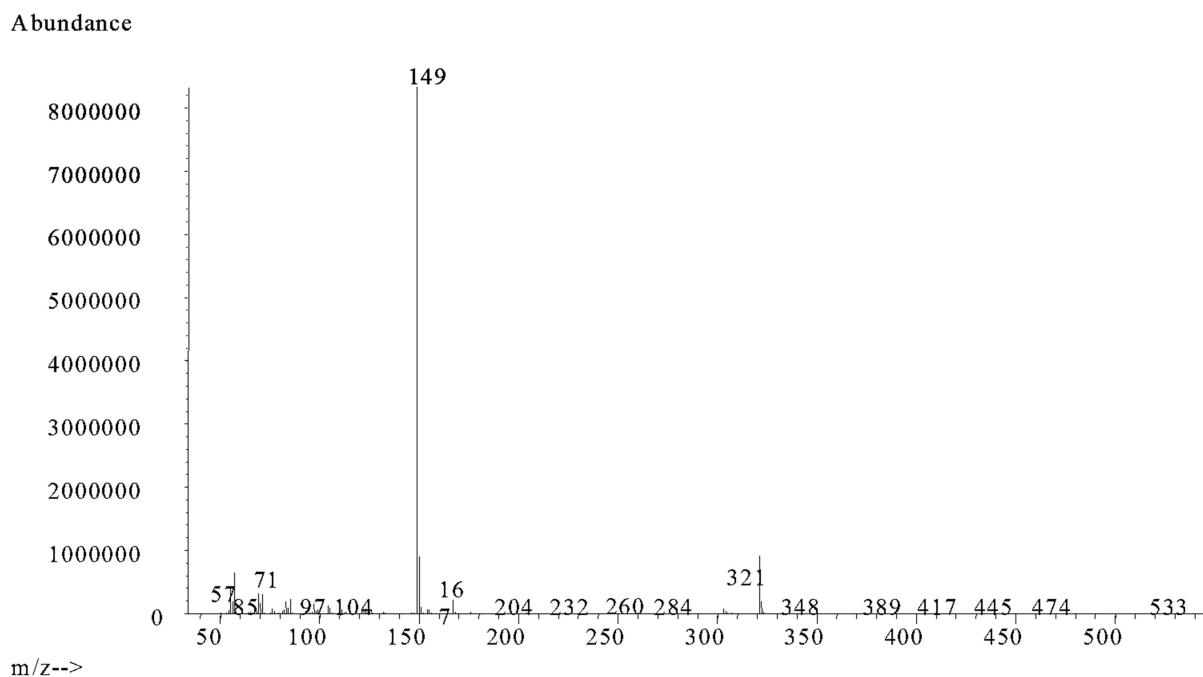


Figura 4.44. Espectro de masas del ftalato de diundecilo.

Tabla 4.13. Fragmentaciones del pico de retención a 107.77 min.

MS	Fragmentaciones	Intensidad relativa
321	$C_{19}H_{29}O_4^+$	15
149	$C_8H_5O_3^+$	100
57	$C_4H_9^+$	7

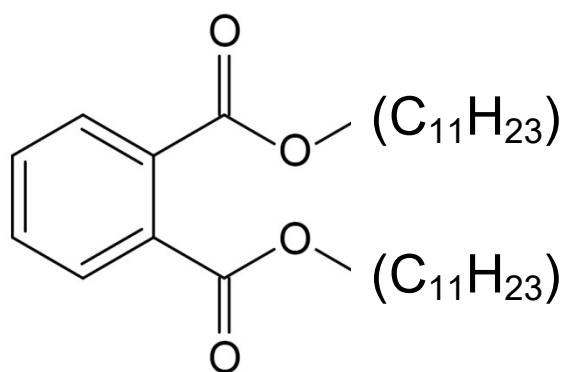


Figura 4.45. Estructura química del ftalato de diundecilo.

Los plastificantes existentes en la formulación de geomembranas de PVC-P suelen llevar dos o tres compuestos como máximo para conseguir una flexibilidad adecuada. El hecho de haber detectado seis plastificantes en la geomembrana de PVC-P de la balsa de El Saltadero, en proporciones muy diferentes, conduce a pensar que los que se encuentran en menor proporción deben ser impurezas presentes en los dos plastificantes principales añadidos en la formulación de la geomembrana. Estos datos hacen creer que los dos plastificantes mayoritarios, presentes en la geomembrana de PVC-P, son el ftalato de didecilo y el ftalato de isodecilundecilo.

Las estructuras químicas del ftalato de didecilo y ftalato de isodecilundecilo se representan en la Figura 4.46 y Figura 4.47.

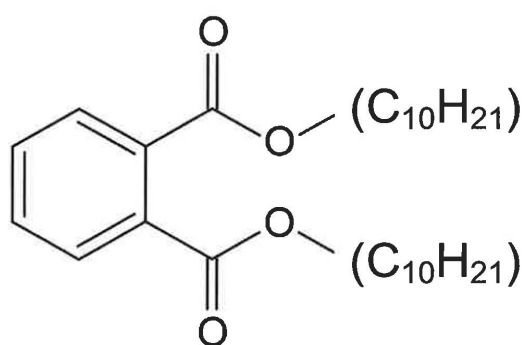


Figura 4.46. Ftalato de didecilo

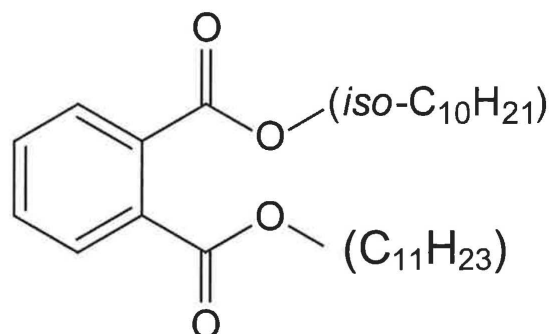


Figura 4.47. Ftalato de isodecilundecilo

Estos dos ésteres presentan unos radicales alquílicos con 10 y 11 átomos de carbono, lo que hace que su peso molecular sea elevado, dando lugar a una menor migración de los mismos desde la geomembrana hacia el exterior.

La diferencia entre estos dos ésteres es la linealidad en sus radicales alquílicos. El ftalato de didecilo está considerado como un plastificante lineal mientras que el ftalato de isodecilundecilo está considerado como un plastificante ramificado.

4.5.4.3. Cálculo del peso molecular del plastificante

Una vez determinados los plastificantes que forman parte de la composición de la geomembrana de PVC-P de la balsa de El Saltadero, se procedió a calcular el peso molecular medio de los mismos aplicando la Ecuación 4.1 definida por Wilson (1995):

Ecuación 4.1. Cálculo del peso molecular medio de los plastificantes.

$$P_M = \frac{[(M_1 \times C_1) + (M_2 \times C_2) + \dots + (M_n \times C_n)]}{C_T}$$

Siendo:

P_M , Peso molecular medio (g/mol)

M_1, M_2, \dots, M_n , Pesos moleculares de cada uno de los plastificantes (g/mol)

C_1, C_2, \dots, C_n , Contenido de cada uno de los plastificantes (%)

C_T , Contenido total de plastificantes (%)

La determinación del tipo y porcentaje de plastificantes extraídos de la geomembrana de PVC-P mediante las técnicas de cromatografía de gases y espectrometría de masas (CG-EM) permitió establecer los siguientes compuestos:

- 1 Ftalato de bis(2-etilhexilo) con un 1.89% y un peso molecular de 390 g/mol.
- 2 Ftalato de diisodecilo con un 11.60 % y un peso molecular de 446 g/mol.
- 3 Ftalato de isodecilnonilo con un 19.25% y un peso molecular de 432 g/mol.
- 4 Ftalato de didecilo con un 32.52 % y un peso molecular de 446 g/mol.
- 5 Ftalato de isodecilundecilo con un 24.98% y un peso molecular de 460 g/mol.
- 6 Ftalato de diundecilo con un 9.76% y un peso molecular de 474 g/mol.

Aplicando la Ecuación 4.1 a los plastificantes extraídos de la geomembrana se determinó el peso molecular medio (P_M):

$$P_M = [(390 \text{ g/mol} \times 1.89 \%) + (446 \text{ g/mol} \times 11.60 \%) + (432 \text{ g/mol} \times 19.25 \%) + (446 \text{ g/mol} \times 32.52 \%) + (460 \text{ g/mol} \times 24.98 \%) + (474 \text{ g/mol} \times 9.76 \%)] / [(1.89\% + 11.60\% + 19.25\% + 32.52\% + 24.98\% + 9.76\%)]$$

$$P_M = 448 \text{ g/mol}$$

El valor del peso molecular obtenido es superior a 400 g/mol que es el recomendado por el PVC Geomembrane Institute (2004) y por el Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas (MARM 2010) para proporcionar una mayor durabilidad de las geomembranas de PVC ya que se considera que este valor del peso molecular influye positivamente en la retención de los plastificantes en la geomembrana (Stark et al. 2005).

4.6. DEGRADACIÓN DE LA GEOMEMBRANA DE PVC

Las geomembranas de PVC-P experimentan tres mecanismos de degradación: pérdida de plastificantes, degradación térmica y fotodegradación (Blanco et al. 2010, 2013a,b). Estos tres procesos tienen lugar simultáneamente o pueden darse por separado.

La degradación térmica y la fotodegradación conducen a la deshidrocloración del PVC dando lugar a un amarilleamiento de la geomembrana que puede llegar a evolucionar hasta un color oscuro debido a la existencia de dienos conjugados en la macromolécula (Castillo, 1986; Castillo y Blanco 1991).

Este fenómeno no se ha observado en la geomembrana de la balsa de El Saltadero. En el seguimiento realizado a lo largo del tiempo, la geomembrana no ha presentado un cambio de color que pudiera hacer pensar en una posible deshidrocloración. El color inicial de la geomembrana se ha mantenido en el material extraído a lo largo del seguimiento realizado en los 16 años de su puesta en obra.

El mecanismo más importante de degradación de las geomembranas de PVC-P es la pérdida de plastificantes presentes en su composición. Los plastificantes presentes en mayor proporción en la geomembrana de la balsa de El Saltadero son el ftalato de didecilo y ftalato de isodecilundecilo. Estos presentan buena compatibilidad con el PVC, sin embargo se ha observado que su contenido en la geomembrana va disminuyendo con el tiempo. A continuación se va a exponer el proceso de pérdida de los plastificantes que experimenta la geomembrana y su influencia en las características físicas y mecánicas.

4.6.1 PÉRDIDA DE PLASTIFICANTES

La extracción de plastificantes se llevó a cabo con éter etílico según el método de ensayo descrito en el capítulo 3. Giroud (1995) estableció el cálculo de la pérdida de plastificantes en una geomembrana de PVC-P ateniéndose al supuesto de que en la extracción de plastificantes se arrastran todos los componentes orgánicos de bajo peso molecular, excepto las cargas inorgánicas y la propia macromolécula. La estimación cuantitativa de la pérdida de plastificantes se ha realizado mediante la Ecuación 4.2.:

Ecuación 4.2. Cálculo de la pérdida de plastificantes según Giroud

$$P_L = \frac{C_{Po} - C_P}{C_{Po}(1 - C_P)} \times 100$$

Siendo:

P_L : pérdida de plastificantes

C_{Po} : contenido inicial en plastificantes

C_P : Contenido final en plastificantes

La pérdida de plastificantes fue calculada aplicando la ecuación de Giroud con los datos del contenido en plastificantes del material extraído de las zonas de coronación e intermedia del talud norte y sur de la balsa de El Saltadero.

La evolución del contenido y pérdida de plastificantes en el talud norte se muestra en la Figura 4.48. El contenido inicial de plastificantes en la geomembrana de PVC era 34.3 % obteniéndose un valor de 16.1% y 18.3% en coronación y zona intermedia, respectivamente, a los 17 años de su instalación.

La pérdida de plastificantes obtenida mediante la ecuación de Giroud a los 17 años fue de 63.2% para la zona de coronación y de 57.1% en la zona intermedia.

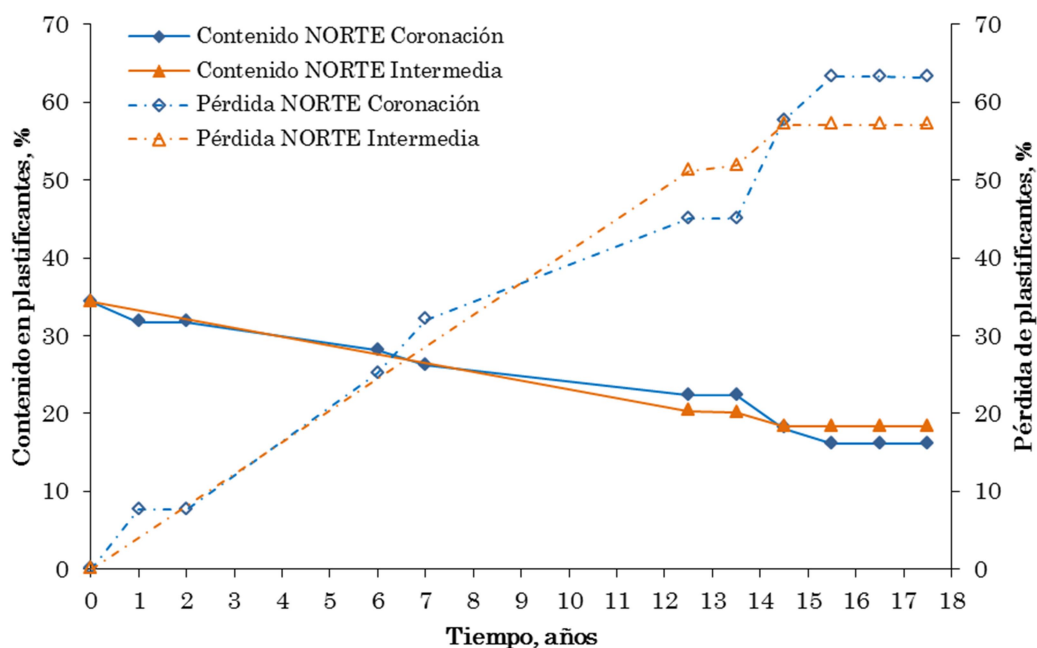


Figura 4.48. Contenido y pérdida de plastificantes en el talud norte de la balsa de El Saltadero.

La evolución del contenido y pérdida de plastificantes en el talud sur se expone en la Figura 4.49. El contenido en plastificantes inicial era 34.3 % obteniéndose un valor de 18.1% y 17.9% en coronación y zona intermedia, respectivamente, a los 17 años.

La pérdida de plastificantes obtenida mediante la ecuación de Giroud a los 17 años fue de 57.6% para la zona de coronación y de 58.2% en la zona intermedia.

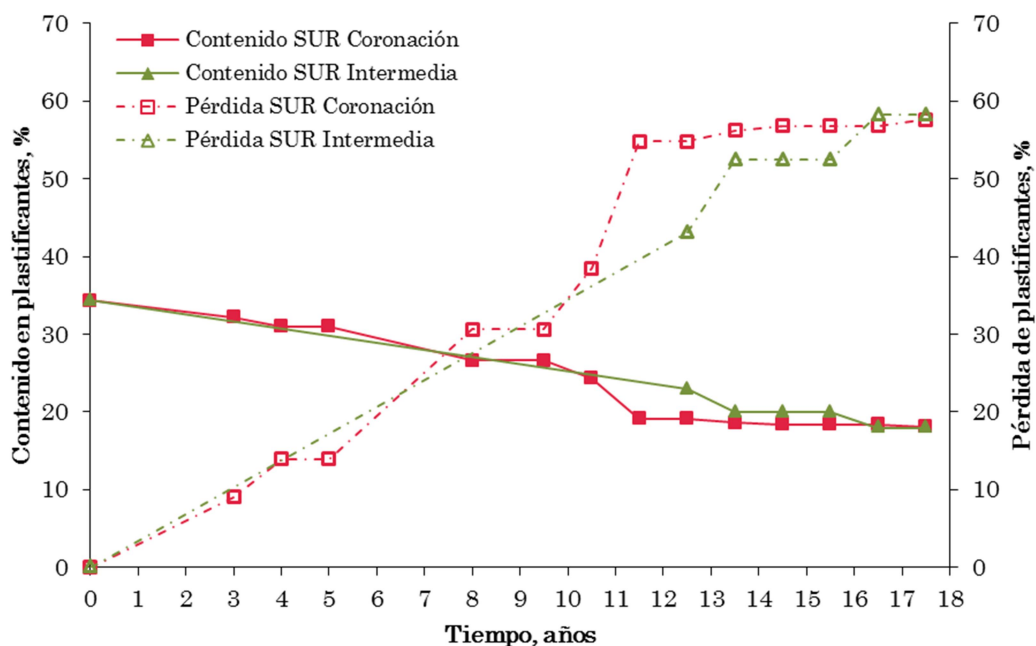


Figura 4.49. Contenido y pérdida de plastificantes en el talud sur de la balsa de El Saltadero.

La Tabla 4.14 muestra los datos de pérdida de plastificantes en coronación y zona intermedia de los taludes norte y sur. Estos datos, calculados según la ecuación de Giroud (Ecuación 4.2) ponen de manifiesto que la menor pérdida de plastificantes tiene lugar en la geomembrana totalmente sumergida, mientras que la mayor pérdida ocurre en la zona de coronación del talud norte de la balsa.

Tabla 4.14. Datos de la pérdida de plastificantes a los 17 años en la balsa de El Saltadero.

ZONA	TALUD	PÉRDIDA DE PLASTIFICANTES, %
Coronación	Norte	63.2
	Sur	57.6
Intermedia	Norte	57.1
	Sur	58.2
Fondo	-	44.4

Los datos de pérdida de plastificantes se muestran comparativamente en la Figura 4.50. La mayor pérdida detectada ha sido del 63.2% en la zona de coronación del talud norte. La pérdida sufrida en la zona de coronación del talud sur 57.6%. En esta figura se aprecia como el talud norte experimenta una pérdida de plastificantes más acusada que el talud sur.

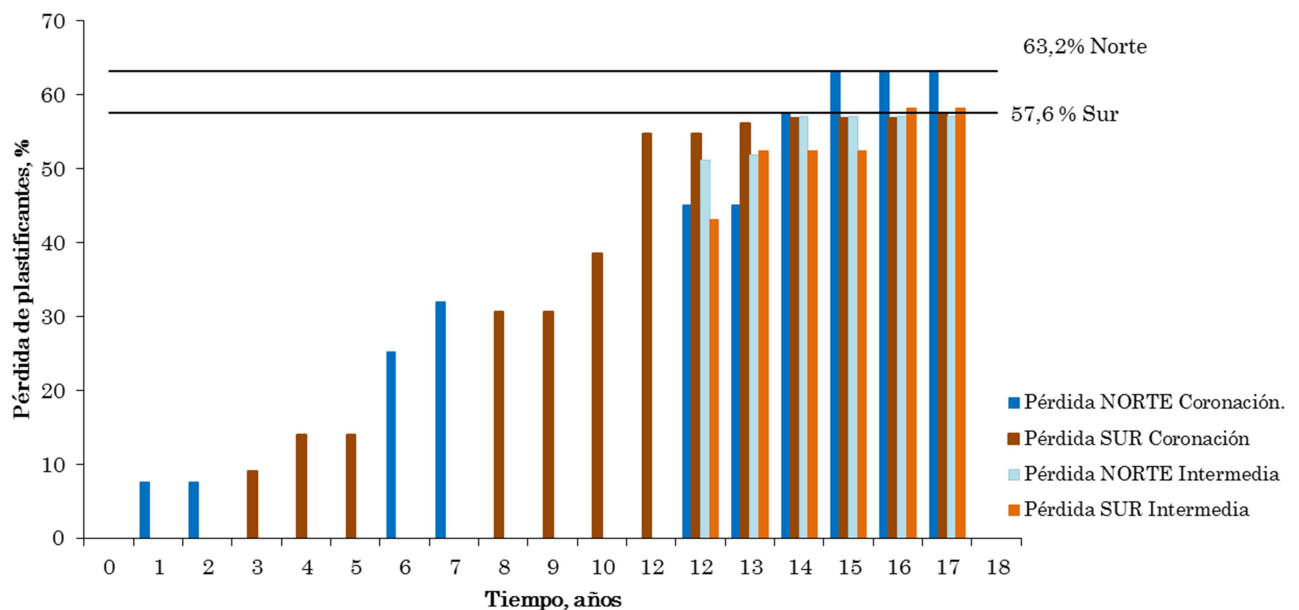


Figura 4.50. Pérdida de plastificantes en los taludes norte y sur de la balsa de El Saltadero.

La pérdida de plastificantes en las geomembranas de PVC tiene lugar a través de tres mecanismos diferentes cuando están en contacto con el medio que la rodea: migración al aire o volatilización y migración a líquidos o a sólidos con los que está en contacto directo (Stark et al. 2005).

Los procesos de pérdida de plastificantes que pueden darse en la geomembrana de PVC instalada en la balsa de El Saltadero son los de pérdida por volatilización y migración al agua.

La migración por volatilización se produce a través de dos procesos de transferencia: difusión del plastificante en el interior de la geomembrana y evaporación del plastificante desde la superficie de la geomembrana al aire. La velocidad de difusión del plastificante es mayor en una geomembrana con un mayor contenido en plastificantes que otra con menor contenido. Stark et al. (2005) explica este fenómeno en base a las fuerzas de Van der Waals con que se une el plastificante a la macromolécula del polímero. Cuando migra el

plastificante hacia la superficie de la geomembrana, las fuerzas de Van der Waals hacen que las moléculas de PVC tiendan a acercarse, lo que incrementa la dificultad de su difusión en la geomembrana. Esto conduce a una disminución de migración de los plastificantes hacia la superficie de la geomembrana a lo largo del tiempo. Este proceso de difusión del plastificante puede llegar a interrumpirse quedando una cantidad de plastificante retenida que hace que la geomembrana mantenga un mínimo de flexibilidad.

Este efecto se aprecia en la geomembrana de la balsa de El Saltadero, especialmente en los últimos años del seguimiento realizado. Se observa que cuanto menor contenido de plastificantes tiene la geomembrana, la pérdida va siendo menor. Este efecto se observa en la zona de coronación del talud norte y del talud sur (Figura 4.48 y Figura 4.49).

La pérdida de plastificantes en la zona de coronación en el talud norte va disminuyendo de forma que cuando la geomembrana alcanza un contenido de plastificantes del 22.3% a los 13 años desde su instalación, la pérdida que experimenta en los dos años siguientes es del 6%, llegando a una situación estable en la que la pérdida de plastificantes en los últimos años del seguimiento es nula.

La zona de coronación del talud sur también experimenta un comportamiento similar en el seguimiento realizado en los 17 años desde la puesta en obra de la geomembrana. En este talud se observa que a los 10 años el contenido de plastificantes es del 24.3% detectándose una pérdida del 5.2% en el año siguiente, llegando a una situación estable en la que la pérdida de plastificantes en los últimos años del seguimiento solo ha variado un 0.5%.

Este proceso se ha observado en el seguimiento realizado por el Área de Materiales del CEDEX en diferentes balsas de las Islas Canarias. El estudio de la pérdida de plastificantes en la balsa de Barranco de Benijos ha mostrado que la difusión del plastificante dentro de la geomembrana va disminuyendo hasta alcanzar una situación de equilibrio en la que la pérdida es prácticamente nula (Noval 2015).

La influencia de la orientación en la durabilidad de la geomembrana se pone de manifiesto en la degradación del material polimérico ya que la incidencia de la radiación solar es más elevada en el talud norte debido a que está orientado hacia el sur. Esta influencia ha sido ampliamente estudiada por el grupo de investigación del CEDEX (Aguiar et al. 2003; Blanco 2012, Noval et al. 2014)

Los datos obtenidos de pérdida de plastificantes en los taludes norte y sur muestran una ligera diferencia. Se ha observado que partiendo de un contenido de plastificantes inicial del 34.3% se ha alcanzado una pérdida del 63.2% en la zona de coronación del talud norte y del 57.6 % en la zona de coronación del talud sur. La geomembrana instalada en la balsa de El Saltadero recibe menor cantidad de radiación solar debido a la cobertura de sombreo instalada en toda su superficie. Esta cobertura de sombreo reduce la radiación solar en un 85%. Debido a esto, la mayor pérdida de plastificante detectada en el talud norte podría deberse a la elevada temperatura que soporta la geomembrana en esta zona de la balsa.

4.7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La pérdida de plastificantes, debido a que es el proceso de degradación más significativo de la geomembrana de PVC-P, afecta a la evolución de sus características físicas y mecánicas dando lugar a la pérdida de flexibilidad de la misma lo que conduce a la disminución de la vida útil de la geomembrana.

4.7.1. EVOLUCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS

La primera característica determinada es el espesor medio de la geomembrana de PVC-P. La evolución de los datos de espesor en la geomembrana se pueden observar en las Figuras 4.6 y 4.7. Los resultados correspondientes al talud norte y sur, tanto en coronación como en la zona intermedia, presentan una tendencia decreciente del espesor medio de la geomembrana.

La disminución del espesor de la geomembrana está asociada a la pérdida de resina polimérica y de plastificantes con el tiempo. Este hecho se pone de manifiesto en los resultados obtenidos del espesor medio de la geomembrana.

La pérdida de plastificantes conduce a cambios importantes en las características de la geomembrana siendo uno de ellos el cambio de las dimensiones de la geomembrana (Giroud 1995).

La disminución del contenido en plastificantes también se pone de manifiesto la prueba de doblado a bajas temperaturas. Este ensayo, realizado a -20°C, aporta información acerca del

estado de la geomembrana de forma que, cuanto menor contenido en plastificantes tiene la geomembrana, más susceptible es a la rotura a bajas temperaturas.

Si relacionamos los resultados de la Tabla 4.3 con el contenido en plastificantes, se observa que a los 13 años de instalación de la geomembrana, las probetas del talud norte coronación todavía presentan un buen comportamiento frente al doblado a -20°C siendo el contenido en plastificantes de 22.3%. A los 14 años el 50% del material sometido a la prueba de doblado sufre la rotura en el lugar de la flexión, siendo el valor del contenido en plastificantes de un 18.1%. Finalmente, cuando el doblado a bajas temperaturas se ha realizado con el material extraído a los 15 y 16 años de instalación de la geomembrana, se observó que se produce la rotura en el 100% de los casos, siendo el contenido en plastificantes 16.1%. En la zona intermedia del talud norte, la rotura se produce en el 50% de los casos a los 14, 15 y 16 años de la puesta en obra de la geomembrana, siendo el valor del contenido en plastificantes de 18.3 %.

Los resultados del doblado a -20°C en el material extraído de las zonas de coronación e intermedia del talud sur, muestran que solamente se producen grietas en el material extraído a los 16 años. El valor del contenido en plastificante en la zona de coronación del talud sur a los 16 años era de 18.4% y en la zona intermedia era de 17.9%.

El resultado de la prueba de doblado a bajas temperaturas pone de manifiesto que con una pérdida del 18% la geomembrana comienza a agrietarse lo que indica que el material se vuelve más rígido cuando el contenido en plastificantes disminuye.

Un comportamiento similar se ha encontrado en las geomembranas de PVC que impermeabilizan la balsa la Cruz Santa (Crespo 2011) y en la balsa de Barranco de Benijos (Noval, 2015)

El impacto dinámico llevado a cabo en todas las muestras de la geomembrana de PVC no produjo ninguna perforación al caer el percutor desde una altura de 500 mm. Este resultado se comprobó posteriormente con la prueba de estanqueidad. Los resultados del impacto dinámico se ven afectados por el envejecimiento de la geomembrana, lo que da lugar a que la altura a la que se produce perforación va decreciendo a lo largo del tiempo. En el caso de la geomembrana de PVC de El Saltadero, estos datos continúan siendo óptimos lo que indica que, a pesar de la pérdida de plastificantes y, como consecuencia, la pérdida de

flexibilidad de la geomembrana, ésta sigue dando buenos resultados frente al impacto dinámico.

Las características mecánicas también se ven afectadas por la disminución del contenido en plastificantes. Los valores de resistencia a la tracción aumentan a medida que disminuye el contenido en plastificantes de la geomembrana. En la Figura 4.10 y Figura 4.11 se observa la tendencia creciente de la resistencia a la tracción en las zonas de coronación e intermedia del talud norte y del talud sur.

Se han analizado los datos de resistencia a la tracción y alargamiento en la carga máxima de la geomembrana a los 15 años de su instalación, ya que se detectó que la geomembrana había sufrido un incremento elevado en estas características (Tabla 4.15). Se observa como de un valor inicial de 1270 N/50mm en sentido longitudinal y 1205 N/50mm en sentido transversal se han alcanzado valores de 2243 N/50mm y 2127 N/50mm en ambos sentidos, respectivamente, en la zona de coronación del talud norte. En la zona de coronación del talud sur se observa que la resistencia a la tracción ha aumentado hasta alcanzar unos valores de 1966 N/50mm y 1851 N/50mm en sentido longitudinal y transversal, respectivamente.

La pérdida de plastificantes a los 15 años en la zona de coronación del talud norte fue de 63.2 % y en el talud sur fue de 56.8 % (Figura 4.48 y Figura 4.49).

Asimismo se observa que en la zona intermedia del talud norte los datos de resistencia a la tracción muestran un valor de 2128 N/50mm en sentido longitudinal y 1906 N/50mm en el sentido transversal y los alcanzados en la zona intermedia del talud sur son 1918 N/50mm y 1791 N/50mm en sentido longitudinal y transversal, respectivamente.

La pérdida de plastificantes a los 15 años en la zona intermedia del talud norte fue de 57.1 % y en el talud sur fue de 58.2 % (Figura 4.48 y Figura 4.49).

La gran pérdida de plastificantes detectada en las zonas estudiadas de los dos taludes explica el elevado aumento de esta característica mecánica ya que se produce una disminución de la flexibilidad de la geomembrana y un aumento de su rigidez que provoca que sea necesario aplicar una elevada carga para producir la rotura del material.

Observando los datos en su conjunto se aprecia que los valores de la resistencia a la tracción en el sentido longitudinal son superiores a los obtenidos en el sentido transversal.

Esto es debido a que las macromoléculas del PVC tienden a orientarse en el sentido longitudinal ya que es el sentido en el que la geomembrana experimenta mayores tensiones en el momento de su fabricación.

Tabla 4.15. Datos de la resistencia a la tracción y alargamiento en la carga máxima a los 15 años desde la instalación de la geomembrana.

CARACTERÍSTICA	INICIAL	CORONACIÓN		INTERMEDIA		FONDO*
		NORTE	SUR	NORTE	SUR	
Resistencia a la tracción, N/50mm						
Longitudinal	1270	2243	1966	2128	1918	1470
Transversal	1205	2127	1851	1906	1791	1333
Alargamiento en la carga máxima, %						
Longitudinal	22	29	28	28	28	27
Transversal	26	34	34	34	34	30
* Los datos del fondo corresponden a los 13 años						

Los datos de alargamiento en la carga máxima en el talud norte y del talud sur se representan en la Figura 4.12 y Figura 4.13, respectivamente. El alargamiento en la carga máxima no presenta grandes variaciones observándose, que en el sentido longitudinal, los valores alcanzados son menores que los del transversal.

En la Tabla 4.15 se puede observar esta evolución en los datos alcanzados en el alargamiento a los 15 años de la puesta en obra de la geomembrana.

La geomembrana de la balsa de El Saltadero lleva un tejido de hilos sintéticos como material de refuerzo o armadura. En este caso el tejido de refuerzo es el responsable de los datos alcanzados tanto en la carga como en el alargamiento. La resistencia a la tracción tiende a incrementarse con la pérdida de plastificantes; en cambio la elongación varía muy poco, debido a que el refuerzo, responsable de esta característica, está protegido por la

resina. Aun cuando el factor principal del fin de la vida útil de una geomembrana de PVC-P sea la pérdida de plastificantes, si la geomembrana es reforzada hay que tener muy en cuenta el tejido de su armadura (Blanco et al. 2016).

La evolución de la resistencia a la perforación en el talud norte se muestra en la Figura 4.14 y la evolución del talud sur en la Figura 4.15. Se observa que los datos alcanzados en la resistencia a la perforación en ambos taludes presentan una tendencia creciente a lo largo del tiempo.

En la Tabla 4.16 se han recopilado los datos obtenidos en la resistencia a la perforación y recorrido del punzón antes de la perforación a los 15 años desde la instalación de la geomembrana.

Se observa como los datos alcanzados en la zona de coronación han pasado de un valor inicial de 415 N/mm en la cara externa y 388 N/mm en la cara interna hasta unos valores de 684 N/mm y 586 N/mm en la cara externa e interna, respectivamente, en la zona de coronación del talud norte. De igual forma se observa que los valores alcanzados en el talud sur han sido de 628 N/mm en la cara externa y 516 N/mm en la cara interna.

Un incremento similar se aprecia en la resistencia a la perforación en las zonas intermedia y fondo de la balsa.

Los valores del recorrido del punzón en el talud norte pueden observar en la Figura 4.16 y los del talud sur en la Figura 4.17. La evolución del recorrido del punzón antes de la perforación muestra una tendencia decreciente a lo largo del tiempo.

Tabla 4.16. Datos de la resistencia a la perforación y del recorrido del punzón antes de perforar a los 15 años desde la instalación de la geomembrana .

CARACTERÍSTICA	INICIAL	CORONACIÓN		INTERMEDIA		FONDO*
		NORTE	SUR	NORTE	SUR	
Resistencia a la perforación, N/mm						
Cara externa	415	684	628	709	720	513
Cara interna	388	586	516	740	501	493
Recorrido del punzón, mm						
Cara externa	18	12	18	17	18	20
Cara interna	17	12	16	17	13	19
* Los datos del fondo corresponden a los 13 años.						

De lo anteriormente expuesto se deduce que la flexibilidad de la geomembrana de PVC debida a la presencia de los plastificantes se va perdiendo con el tiempo a medida que éstos aditivos desaparecen. Como consecuencia de este hecho la geomembrana experimenta una rigidez que se pone de manifiesto en los datos de resistencia a la tracción, alargamiento en la carga máxima, doblado a bajas temperaturas, resistencia a la perforación y recorrido del punzón antes de la perforación.

Los datos de resistencia de la soldadura por el método de tracción y pelado en el talud norte y sur (Figura 4.18 y Figura 4.19) muestran un ligero incremento a lo largo del tiempo debido al aumento de la rigidez de la geomembrana. Los resultados de la resistencia de la soldadura por tracción se asemejan a un ensayo de resistencia a la tracción en el sentido transversal de la geomembrana. La soldadura se considera correcta cuando la rotura de la probeta ensayada ocurre en la zona próxima a la soldadura pero fuera de la misma.

El método de pelado proporciona una información cuantitativa de la resistencia de la soldadura. Los resultados de esta prueba muestran una disminución acusada tanto en el talud norte como en el sur, en los primeros años del seguimiento de la geomembrana,

alcanzándose una tendencia constante en los últimos años. A pesar de los valores bajos en esta prueba, la geomembrana no muestra signos de deterioro en las zonas de soldadura entre paños.

La microscopía óptica y electrónica son conocidas en el campo de la Obra Hidráulica para materiales inorgánicos (Soriano et al 2007, Velasco et al 2008) y desconocidas casi por completo en campo de materiales orgánicos. No obstante, el Área de Materiales del CEDEX lleva más de 25 años aplicando estas técnicas en el campo de las geomembranas impermeabilizantes (Blanco et al. 2002, Soriano et al 2006, 2010).

El estudio realizado mediante microscopía óptica y electrónica permite observar la textura y morfología de la geomembrana así como detectar alteraciones en la superficie de la misma que no son visibles por otros procedimientos. Las microscopías óptica y electrónica permiten apreciar el deterioro de la geomembrana por la aparición de microfisuras y microgrietas detectadas en la superficie. Asimismo se observa la presencia de microorganismos presentes en el medio que rodea a la geomembrana.

El empleo de la cromatografía de gases junto con la espectrometría de masas ha permitido determinar la estructura molecular de los plastificantes y el peso molecular de dichos aditivos.

La cromatografía de gases ha suministrado información acerca del número de plastificantes presentes en la geomembrana de PVC así como la proporción en la que se encuentran. El estudio por cromatografía de gases se llevó a cabo en el plastificante extraído de la muestra de geomembrana de PVC correspondiente a los 9 años de su puesta en obra. El cromatograma obtenido, Figura 4.33, muestra la aparición de seis picos a tiempos de retención de 57.60, 83.56, 90.23, 96.37, 102.24 y 107.77 min., lo que indica la existencia de seis ésteres diferentes con los siguientes porcentajes 1.89%, 11.60%, 19.25%, 32.52%, 24.98% y 9.76% respectivamente.

El análisis de cada uno de compuestos mediante espectrometría de masas dio lugar a la determinación de las estructuras químicas de los seis plastificantes presentes en la geomembrana de la balsa de El Saltadero. Los plastificantes identificados fueron el ftalato de ftalato de bis(2-etilhexilo), ftalato de diisodecilo, ftalato de isodecilnonilo, ftalato de didecilo, ftalato de isodecilundecilo y ftalato de diundecilo.

El cálculo del peso molecular medio del plastificante de la geomembrana mediante la ecuación 4.1 (Wilson 1995) dio lugar a un valor de 448 g/mol. Este valor es superior a 400 g/mol que es el indicado por el PVC Geomembrane Institute (2004) y por el Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas (MARM 2010) para proporcionar una mayor durabilidad de las geomembranas de PVC.

Los plastificantes detectados en mayor proporción han sido el ftalato de didecilo y ftalato de isodecilundecilo. El ftalato de didecilo es un plastificante lineal mientras que el ftalato de isodecilundecilo es ramificado.

Analizando lo obtenido en la identificación de los plastificantes presentes en la geomembrana de PVC, se aprecia que el peso molecular del plastificante, 448 g/mol, indica que la geomembrana presenta una buena durabilidad.

Este hecho parece confirmar el buen estado de la geomembrana de PVC de la balsa de El Saltadero a pesar de su elevada pérdida de plastificantes, 63.2% y 57.6% en la zona de coronación de los taludes norte y sur, respectivamente.

4.8 BIBLIOGRAFÍA

20 años BALTEN (2010). Ed. OAL BALTEN. Santa Cruz de Tenerife.

AENOR (2008) *UNE 104426, Impermeabilización. Puesta en obra. Construcción de balsas cubiertas impermeabilizadas con geomembranas sintéticas.*

Aguiar, E., Blanco, M., Soriano, J. y Vara, T. (2003). *Influencia de la orientación en la degradación del poli(cloruro de vinilo) plastificado utilizado como geomembrana sintética en la impermeabilización del embalse de la Tabona.* Ingeniería Civil **130**, 95-103.

Blanco, M. (2012) *Spanish experience in the use of synthetic geomembranes for hydraulic works.* Keynote Lecture, in Blanco et al. (Eds.) Eurogeo5, Ed. R. B. Servicios Editoriales, S. L., 7-23 (electronic proceedings) Vol. 1: XXI-XXXIX (printed volumes). Valencia, septiembre.

Blanco, M., Aguiar, E., Cea, J.C. de, Castillo, F., Soriano, J. y García, F. (2008). *Comportamiento de geomembranas de polietileno de alta densidad (PEAD) utilizadas en la impermeabilización de balsas*. Proc. 2º Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación y Obra Pública y 2º Congreso Internacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas. pp. 417-430. Palma de Mallorca.

Blanco, M., Crespo, M. A., Noval, A. M., Leiro, A., Mateo, B., Aguiar, E., Vara, T. y Giroud, J.P. (2013b) *La durabilidad de geomembranas de PVC-P en función del aditivo utilizado como plastificante*. Proc. Congreso Geosintec Iberia 1, 138-146. Sevilla, noviembre.

Blanco, M.; Rico, G.; Pargada, L.; Aguiar, E.; Castillo, F. y Crespo, M.A. (2010) *Influencia del tipo de plastificante en la durabilidad de las geomembranas de PVC-P*. Proc. 3er Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación, Obra Civil y Balsas y 3er Simposio Nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas, pp. 347-357. Barcelona, octubre.

Blanco, M., Solera, R., Giroud, J. P., Pérez Sánchez, M., Redón Santafé, M., Sánchez Romero, F. J., Torregrosa Soler, J. B. y Zapata Raboso, F. A. (2016). *Characteristics of six PVC-P geomembranes installed in reservoirs in Spanish Mediterranean Basin*. Eurogeo6. 600-608. Ljubljana, september.

Blanco, M., Soriano, J., Aguiar, E. & Zaragoza, G. (2002). *Análisis microscópico de geomembranas sintéticas utilizadas en la impermeabilización de embalses*. Ingeniería Civil **127**, 51-59.

Blanco, M., Touze-Foltz, N., Amat, B., Castillo, F. y Aguiar, E. (2013a). *Comportement d'une géomembrane EPDM 18 ans après son installation dans la retenue d'El Boquerón (Tenerife, España)* Proc. 9^{èmes} Rencontres Géosyntétiques pp. 405-413. Dijon (Francia), abril.

Castillo, F (1986). *Estudio de la influencia de la tacticidad en la fotodegradación del poli(cloruro de vinilo)*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

Castillo, F. y Blanco, M. (1991). *Síntesis, caracterización y fotodegradación en atmósfera inerte de diferentes tipos de poli(cloruro de vinilo)*. Pub. CEDEX. Monografía M-20. Ed. Neografis. Madrid.

Crespo, M. A. (2011). *Comportamiento de barreras geosintéticas poliméricas (GBR-P) a base de poli(cloruro de vinilo) plastificado de distinta formulación, instaladas en embalses*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

Giroud, J. P. (1995). *Evaluation of PVC geomembrane shrinkage due to plasticizer loss*. Geosynthetics International, **2**(6), 1099-1113.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2010). *Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas*. Ed. Comité Nacional Español de Grandes Presas.

Noval, A. M. (2015). *Estudio del comportamiento de tres geomembranas de EPDM, PVC-P y PEAD a lo largo del tiempo*. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III, Madrid.

Noval, A.M., Blanco, M., Castillo, F., Leiro, A. Mateo, B, Giroud, G.P., Aguiar, E., Torregrosa, J.B. y Sánchez, F.J. (2014). *Influence of orientation on ageing of a reinforced PVC geomembrane*. 10th International Conference on Geosynthetics. Berlin, septiembre.

Renz, O. (2005). *Balsas cubiertas*. Proc. I Simposio nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas. Sevilla, diciembre.

Soriano, J., Alaejos, P., Bermúdez, M.A., García Calleja, M.A. y Lanza, V. (2007). *Estudio del hormigón de una presa afectada por la reacción álcali-árido*. Ingeniería Civil **146**, 49-54.

Soriano, J. Blanco, M., Aguiar, E. y Burgos, J. (2010). *La microscopía como método de análisis en el estudio de geomembranas sintéticas de PVC-P*. Proc. 3^{er} Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación, Obra Civil y Balsas y 3^{er} Simposio Nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas. 411-422. Barcelona.

Soriano, J. Blanco, M., Aguiar, E. y Cea, J.C. (2006). *Las técnicas de microscopía óptica de reflexión y electrónica de barrido en el conocimiento del estado de las geomembranas sintéticas*. Ingeniería Civil **143**, 17-22.

Stark, T. D., Choi, H. y Diebel, P. W. (2005). *Influence of plasticizer molecular weight on plasticizer retention in PVC geomembranes*. Geosynthetics International, **12**, 99-110.

Velasco, A., García Calleja, M.A. y Soriano, J. (2008). *Aplicación de técnicas microscópicas en el estudio de la reactividad potencial de los áridos*. VIII Jornadas Españolas de Presas. Córdoba, noviembre.

Wilson, A. S. (1995). *Plasticizers: principles and practice*. The Institute of Materials.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LA GEOMEMBRANA DE PVC-P INSTALADA EN EL CAMPO EXPERIMENTAL DE LA Balsa DE EL SALTADERO

CAPITULO 5. RESULTADOS DE LA GEOMEMBRANA DE PVC-P INSTALADA EN EL CAMPO EXPERIMENTAL DE LA Balsa DE EL SALTADERO

5.1. DESCRIPCIÓN DEL CAMPO EXPERIMENTAL DE LA Balsa DE EL SALTADERO

El campo experimental está situado dentro del recinto del embalse cubierto de El Saltadero (Figura 5.1). La construcción del campo experimental se realizó sobre un talud artificial en el que se aplicó una capa de hormigón poroso con objeto de situar una serie de materiales poliméricos de nueva implantación y otros, cuyo comportamiento a la intemperie era desconocido en el campo de la impermeabilización en nuestro país. El campo experimental está ubicado hacia el sur, orientación que recibe mayor radiación solar en el hemisferio norte, con objeto de evaluar el comportamiento a la intemperie de estos nuevos materiales (Aguilar et al. 2012, Blanco et al. 2005, 2009)



Figura 5.1. Situación del campo experimental en el recinto de la balsa de El Saltadero.

La naturaleza de las geomembranas sintéticas instaladas en el campo experimental comprendía un amplio grupo de materiales poliméricos como el poli(cloruro de vinilo) plastificado (PVC-P), polietileno de alta, media y baja densidad (PEAD, PEMD y PEBD), copolímeros de etileno-acetato de vinilo (EVA/C), polietileno clorosulfonado (CSM), polipropileno (PP), Etileno-propileno-dieno monómero (EPDM) y poliolefinas termoplásticas (TPO) y elastoméricas (POE). Posteriormente, en los últimos años, se procedió a la instalación una geomembrana bituminosa constituida por betún modificado con estireno-butadieno-estireno (SBS).

En la Figura 5.2 se puede ver la disposición del campo experimental, en el recinto de la balsa de El Saltadero, con las geomembranas ancladas al soporte de hormigón en el talud norte.



Figura 5.2. Seguimiento de las geomembranas en el campo experimental en la balsa de El Saltadero.

El estudio de la durabilidad de los materiales poliméricos se lleva a cabo, de forma general, mediante ensayos de laboratorio a través de diferentes métodos de envejecimiento, como la resistencia al ozono de elastómeros, envejecimiento mediante radiación UV y resistencia a la oxidación mediante envejecimiento a altas temperaturas. Los resultados de estos

estudios de durabilidad proporcionan una información valiosa para comparar el tiempo de vida útil de una geomembrana (Koerner 1999).

Sin embargo las condiciones medioambientales hacen que el comportamiento del material polimérico expuesto a la intemperie sea diferente al mostrado en los ensayos de laboratorio.

Este hecho ha conducido a que, tanto empresas de gran importancia a nivel internacional como centros de investigación, instalen campos de pruebas en zonas de climatologías adversas como en EE.UU., La Florida y Arizona (Crespo 2016) y la Península Arábiga (Aguiar et al. 2012).

El estudio de las geomembranas instaladas en el campo experimental de El Saltadero ha permitido obtener unos datos experimentales que en bastantes materiales eran desconocidos, y que sirvieron de base para establecer las exigencias mínimas requeridas a las láminas impermeabilizantes en la elaboración del “Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas” (MARM 2010). Asimismo, la importancia de este campo experimental de El Saltadero ha sido mencionada por la International Commission on Large Dams en su último boletín publicado en París en 2010 (ICOLD 2010).

El campo experimental, al estar ubicado dentro del recinto de la balsa de El Saltadero, se ve afectado por los datos climatológicos que se han detallado en las Tablas 4.1 y 4.2. Estos proceden de la estación meteorológica situada en el Aeropuerto de Tenerife Sur y de la estación meteorológica de las Galletas, situada en la cota 73, en el municipio de Arona, próximo a la balsa de El Saltadero.

5.2. MUESTRAS EXTRAIDAS DEL CAMPO EXPERIMENTAL

La extracción de muestras en el campo experimental se llevó a cabo de forma anual y las características determinadas son las mencionadas en el capítulo 3 de Metodología Experimental. Seguidamente se van a exponer los resultados obtenidos en los ensayos realizados a la geomembrana. Posteriormente dichos resultados se analizarán de acuerdo a lo alcanzado en los ensayos físico-químicos y mecánicos. Asimismo, se tendrán en cuenta los datos observados en el estudio microscópico y los aportados con las técnicas de espectroscopia IR-TF, cromatografía de gases y espectrometría de masas. Finalmente, se

evaluará la degradación de esta geomembrana, expuesta a la radiación solar, y se relacionará con los parámetros que más afectan a su durabilidad.

5.3. EXPERIMENTAL

5.3.1. CARACTERISTICAS FISICO-QUIMICAS

5.3.1.1. Espesor

Los resultados obtenidos en la determinación del espesor a lo largo de los 16 años de instalación de la geomembrana en el probetario del campo experimental muestran una tendencia decreciente (Figura 5.3). El valor inicial del espesor es de 1.51 mm alcanzando 1.47 mm a los 16 años.

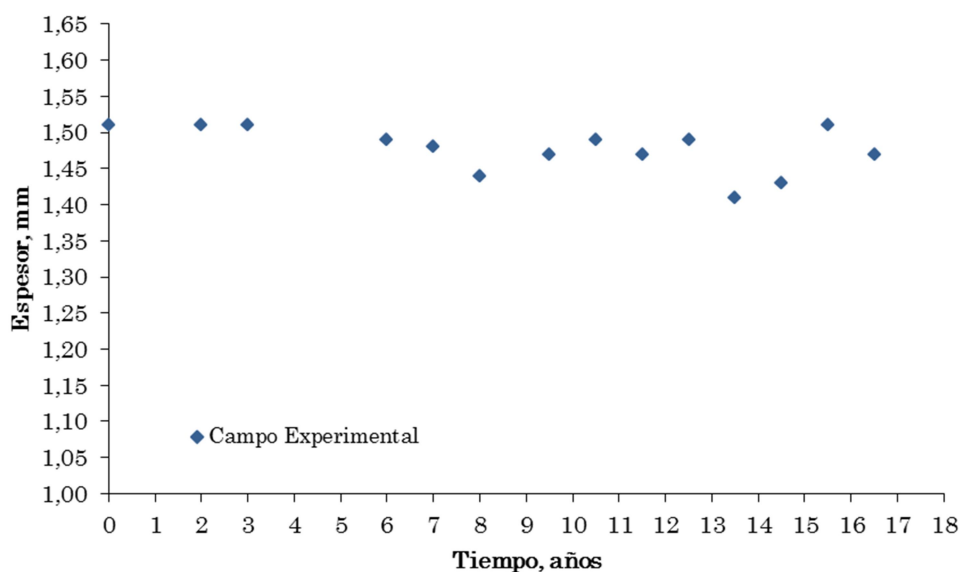


Figura 5.3. Evolución del espesor en la geomembrana del campo experimental en función del tiempo.

5.3.1.2. Doblado a bajas temperaturas

La determinación del doblado a bajas temperaturas muestra que las probetas ensayadas a $-20\pm 1^{\circ}\text{C}$ no han sufrido rotura ni grietas en el lugar de la flexión a lo largo de los 16 años de

su instalación en el campo experimental, lo que indica que presenta un buen comportamiento a pesar de su exposición a la radiación procedente del sol.

5.3.1.3. Resistencia al impacto dinámico

El impacto dinámico llevado a cabo en todas las muestras extraídas no produjo ninguna perforación al caer el percutor desde una altura de 500 mm. Este resultado se comprobó posteriormente con la prueba de estanqueidad.

Los resultados del impacto dinámico son correctos si se tiene en cuenta el tiempo de exposición a la intemperie que ha transcurrido desde su instalación.

5.3.1.4. Contenido en plastificantes

Los datos del contenido en plastificantes de la geomembrana de PVC-P expuesta en el campo experimental de la Balsa de El Saltadero se muestran en la Tabla 5.1.

Originalmente el contenido en plastificantes era de 34.3% pasando a 24.6% a los 17 años de su instalación.

En la Figura 5.4 se aprecia la tendencia decreciente del contenido en plastificantes a lo largo del tiempo. Asimismo se observa como esta disminución tiene lugar de una forma escalonada hasta mantenerse prácticamente constante en los últimos años del seguimiento de la geomembrana.

Tabla 5.1. Contenido en plastificantes de la geomembrana del campo experimental en función del tiempo.

TIEMPO DE INSTALACIÓN, AÑOS	CONTENIDO EN PLASTIFICANTES, %
0	34.3
2	31.6
3	31.6
6	27.2
7	27.2
8	27.2
9	27.1
10	27.1
11	26.4
12	26.4
13	26.4
14	25.6
15	25.6
16	25.6
17	24.6

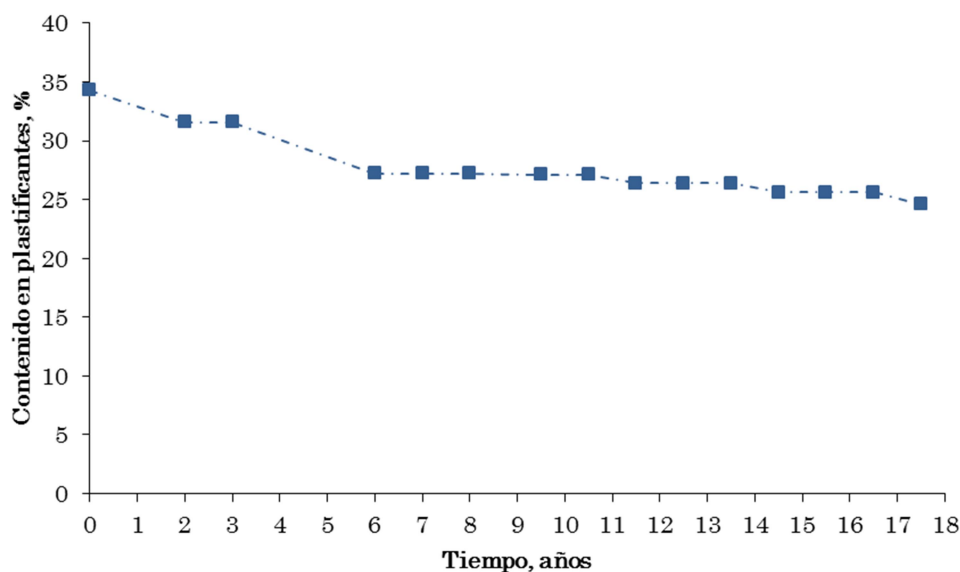


Figura 5.4. Evolución del contenido en plastificantes en la geomembrana del campo experimental en función del tiempo.

5.3.2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

5.3.2.1. Resistencia a la tracción y alargamiento

Los datos de la resistencia a la tracción y alargamiento en el punto de carga máxima a lo largo de los 16 años de su instalación se muestran en las Figuras 5.5 y 5.6, respectivamente.

En la Figura 5.5 se observa como la resistencia a la tracción presenta una tendencia creciente en el sentido longitudinal y transversal. El valor inicial de resistencia a la tracción en la carga máxima en sentido longitudinal es de 1270 N/50 mm, convirtiéndose en 1492 N/50mm y en sentido transversal 1205 N/50mm inicialmente hasta 1304 N/50mm, a los 16 años.

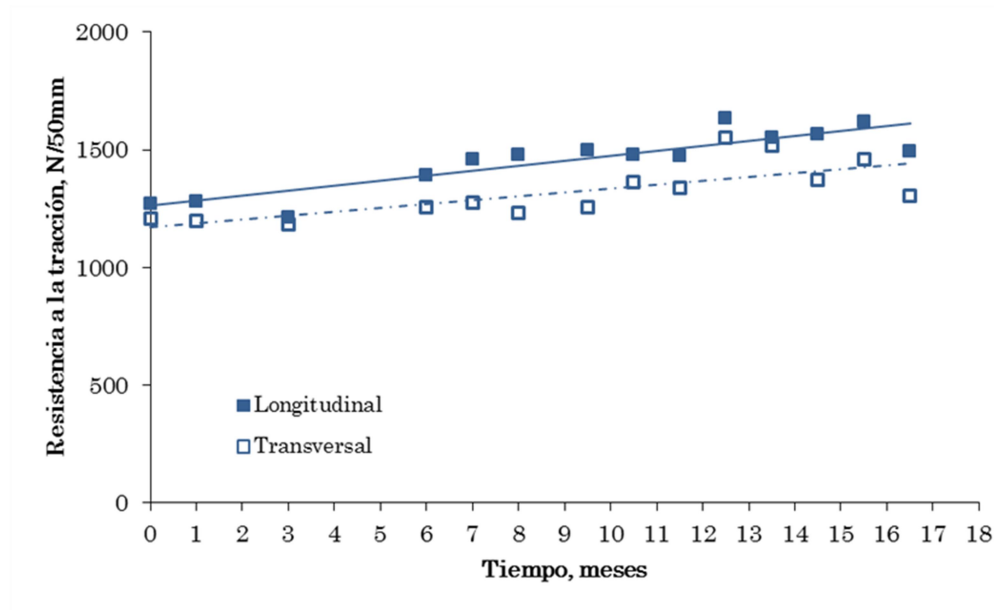


Figura 5.5. Evolución de la resistencia a la tracción en el punto de carga máxima en función del tiempo.

La evolución de la resistencia a la tracción en el punto de carga máxima experimenta una tendencia creciente debido a la disminución de la flexibilidad de la geomembrana y al aumento de su rigidez, todo ello debido a la pérdida de plastificantes. Asimismo, se observa que los datos del sentido longitudinal son superiores a los del sentido transversal debido a la constitución del tejido de refuerzo de la geomembrana.

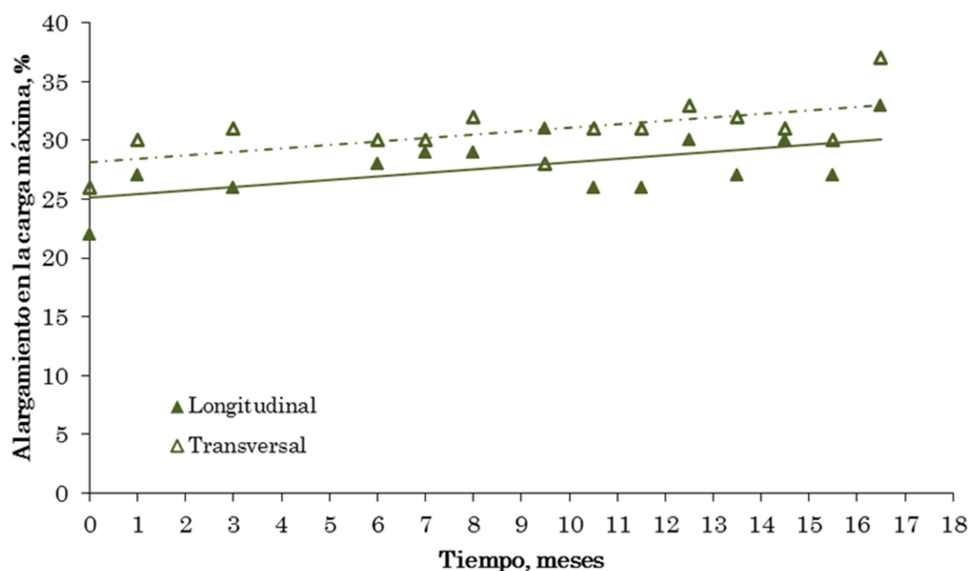


Figura 5.6. Evolución del alargamiento en el punto de carga máxima en función del tiempo.

La evolución del alargamiento en la carga máxima se muestra en la Figura 5.6. Se observa que los datos de alargamiento no presentan una gran variación a lo largo de los 16 años de la puesta en obra de la geomembrana. Los datos en el sentido longitudinal son menores que los del sentido transversal debido al refuerzo de tejido de hilos sintéticos que lleva insertado la geomembrana.

5.3.2.2. Resistencia al impacto estático

La resistencia al impacto estático o perforación se determinó según se ha descrito en el capítulo 3 de Metodología Experimental, llevándose a cabo el ensayo en el sentido de compresión de la máquina universal.

Los datos obtenidos se muestran en la Figura 5.7, observándose un incremento a lo largo de los años de instalación de la geomembrana. Inicialmente, la resistencia a la perforación en la cara externa es de 415 N/mm alcanzando un valor de 578 N/mm a los 16 años de la puesta en obra de la geomembrana. La misma tendencia se observa en los resultados obtenidos en la cara interna, de forma que partiendo de un valor inicial de 388 N/mm pasa a 457 N/mm a los 16 años.

Observando el conjunto de datos obtenidos, se aprecia que los valores alcanzados en la cara externa son ligeramente superiores a los de la cara interna.

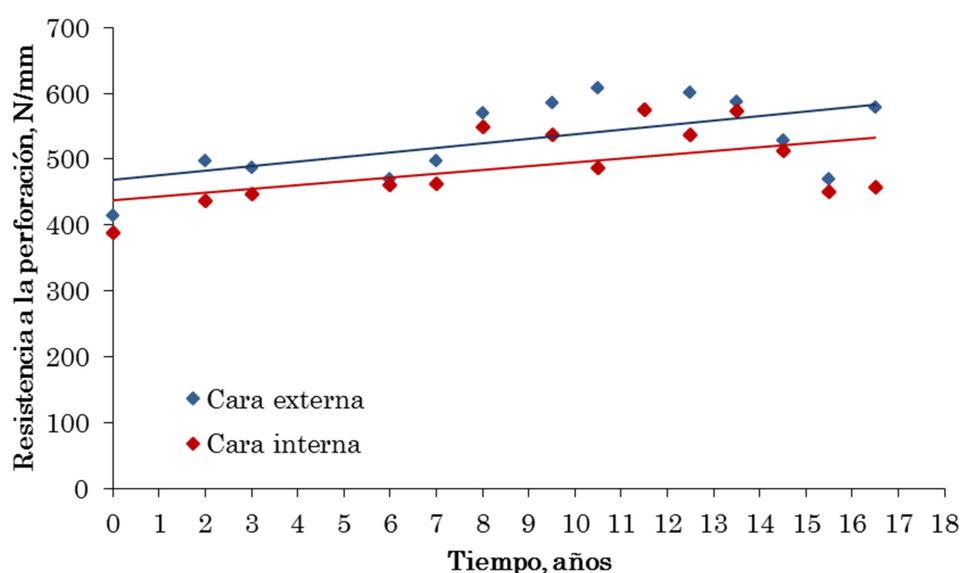


Figura 5.7. Evolución de la resistencia a la perforación en la muestra del campo experimental en función del tiempo.

La Figura 5.8 representa los datos del recorrido del punzón a lo largo del tiempo. Se puede comprobar una tendencia decreciente, pasando de 18 mm y 17 mm en las caras externa e interna, respectivamente, a 17 mm y 10 mm en ambas caras, respectivamente, a los 16 años.

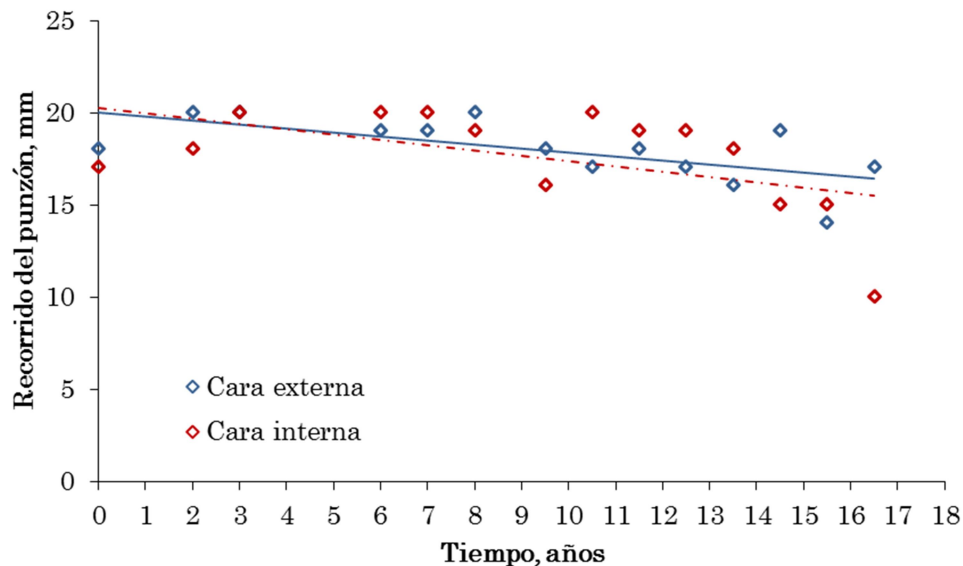


Figura 5.8. Evolución del recorrido del punzón en función del tiempo.

5.3.2.3. Resistencia de la soldadura

La evolución de la resistencia de la soldadura por el método de tracción y pelado se muestran en la Figura 5.9. Se puede observar que la resistencia de la soldadura por el método de tracción experimenta una tendencia creciente a lo largo del tiempo. El valor inicial es de 1239 N/50mm, aumentando a lo largo del tiempo hasta llegar a 1328 N/50mm a los 16 años desde la instalación de la geomembrana.

En el caso de la resistencia de la soldadura por el método del pelado no se observa una variación importante a lo largo del tiempo. El valor inicial es de 561 N/50mm llegando a 630 N/50mm a los 16 años.

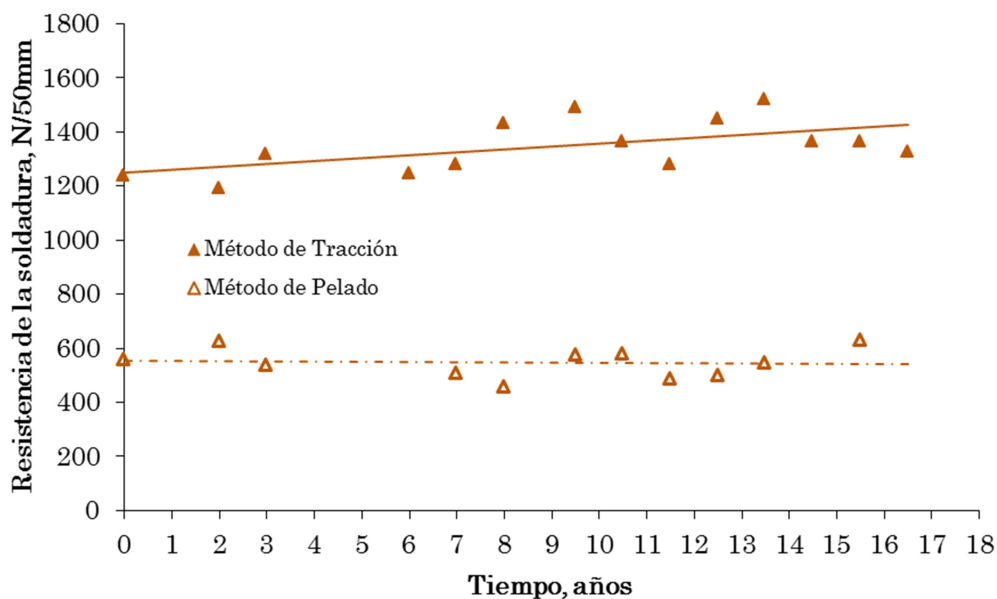


Figura 5.9. Evolución de la resistencia de la soldadura por tracción y pelado en la muestra del campo experimental.

5.3.3. ESTUDIO MICROSCÓPICO

5.3.3.1. Microscopia óptica de reflexión

La microscopía óptica de reflexión (MOR) se ha realizado en todas las muestras extraídas en el seguimiento de la geomembrana del campo experimental. En este epígrafe se expone el estudio microscópico inicial, a los 6 años de la instalación de la geomembrana, y el realizado en los seguimientos posteriores, comprendidos entre los 11 y 16 años de la puesta en obra, por ser los más significativos en cuanto a la evolución de la degradación de la geomembrana.

Las microfotografías de la Figura 5.10 corresponden a la MOR realizada a 60x en la cara externa e interna de la geomembrana a los 6 años de su puesta en obra. En estas imágenes se puede apreciar el buen estado del poli(cloruro de vinilo) ya que no se observan alteraciones superficiales en ninguna de las dos caras.

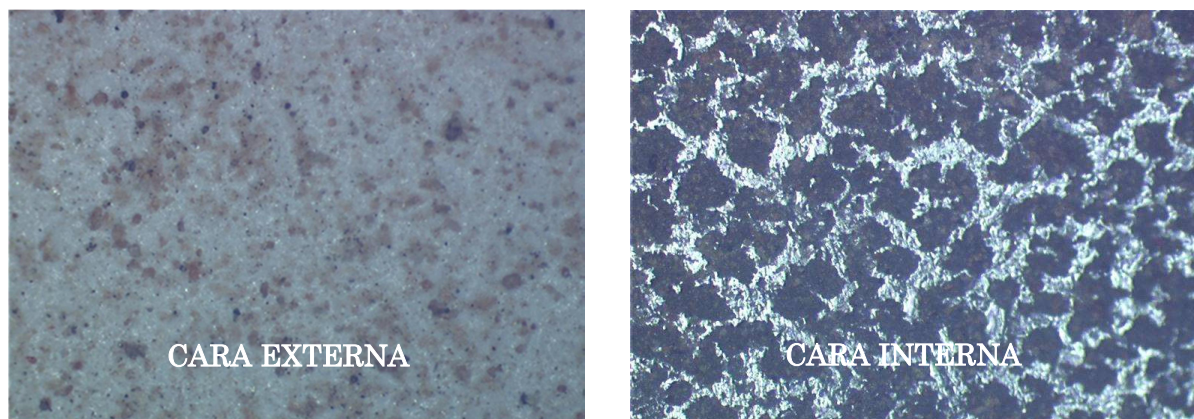


Figura 5.10. Microfotografías MOR a 60x de la cara externa e interna de la geomembrana a los 6 años desde su instalación.

Las Figuras 5.11 y 5.12 muestran la microscopía MOR a 60x realizada en el seguimiento comprendido entre los 11-13 años y entre los 14-16 años de la puesta en obra de la geomembrana, respectivamente. En las microfotografías se aprecia como a los 11 años el poli(cloruro de vinilo) presenta grietas y fisuras, lo que indica que comienza a degradarse. La evolución de las grietas y fisuras se observa en las microfotografías correspondientes a los años posteriores en las que se pueden ver cómo han adquirido un mayor tamaño a los 16 años. La cara interna de la geomembrana no presenta alteraciones superficiales apreciables.

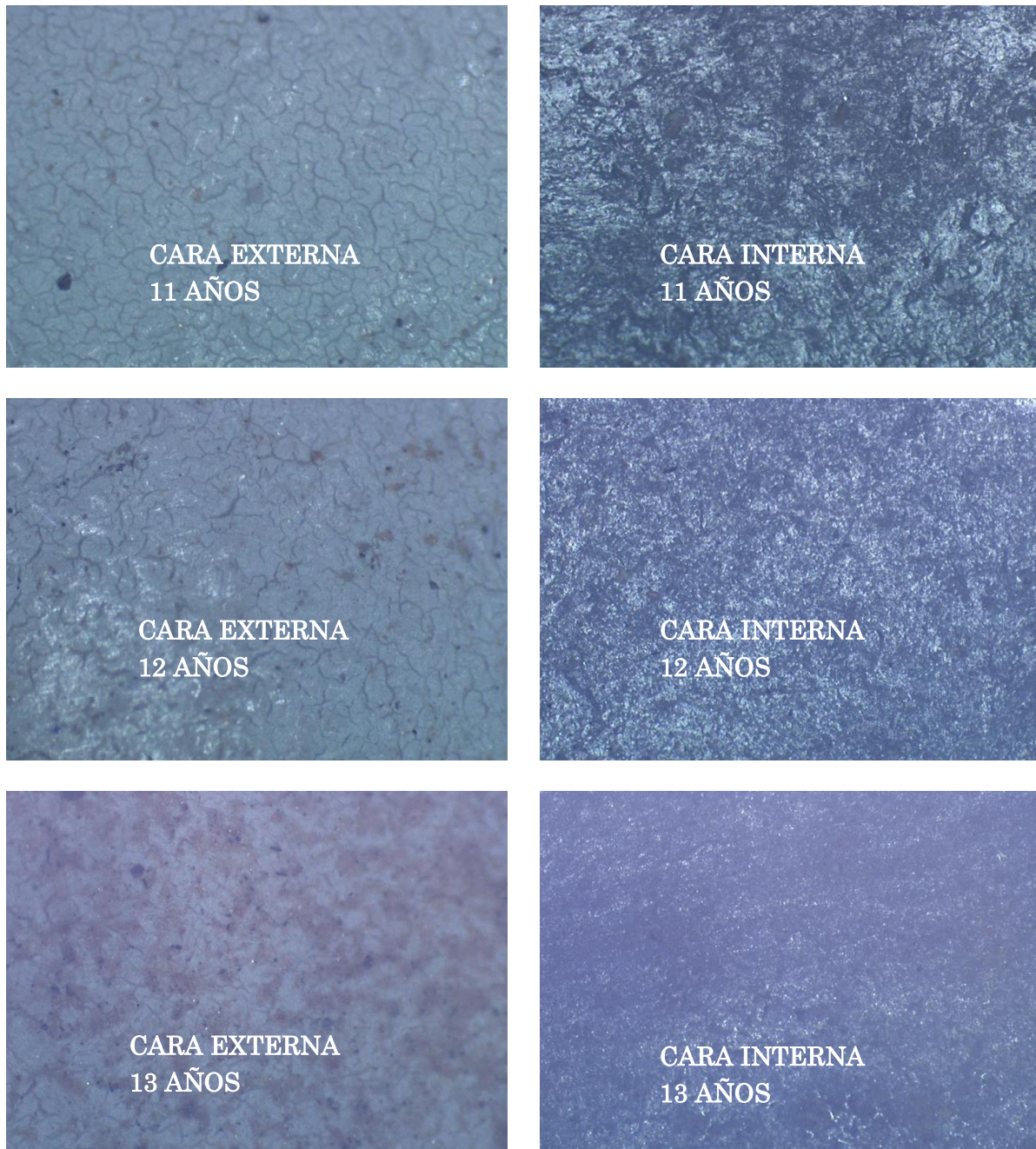


Figura 5.11. Microscopía MOR a 60x de la geomembrana del campo experimental realizada en ambas caras de la geomembrana desde los 11 a los 13 años de su puesta en obra.

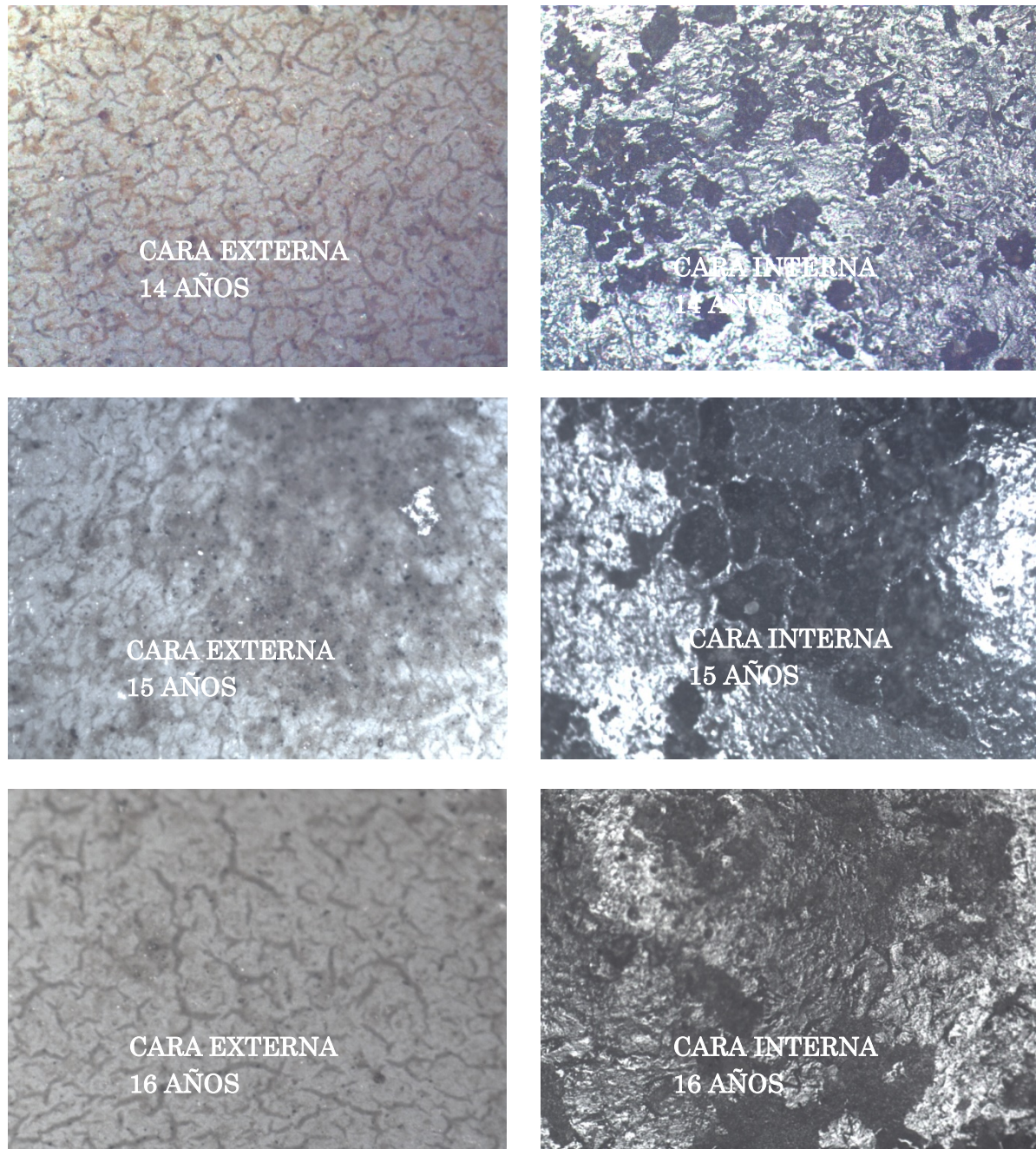


Figura 5.12. Microscopía MOR a 60x de la geomembrana del campo experimental realizada en ambas caras de la geomembrana desde los 14 a 16 años de su puesta en obra.

5.3.3.2. Microscopia electrónica de barrido

La microscopía electrónica de barrido (MEB) se ha realizado a 90x y 900x en las dos caras de la geomembrana. En este apartado se exponen las microfotografías realizadas por la cara externa debido a que es la que presenta los cambios más significativos en la degradación de la geomembrana. La Figura 5.13 muestra la cara externa de la geomembrana a los 6 años de su puesta en obra. No se aprecian grietas ni fisuras en la muestra.

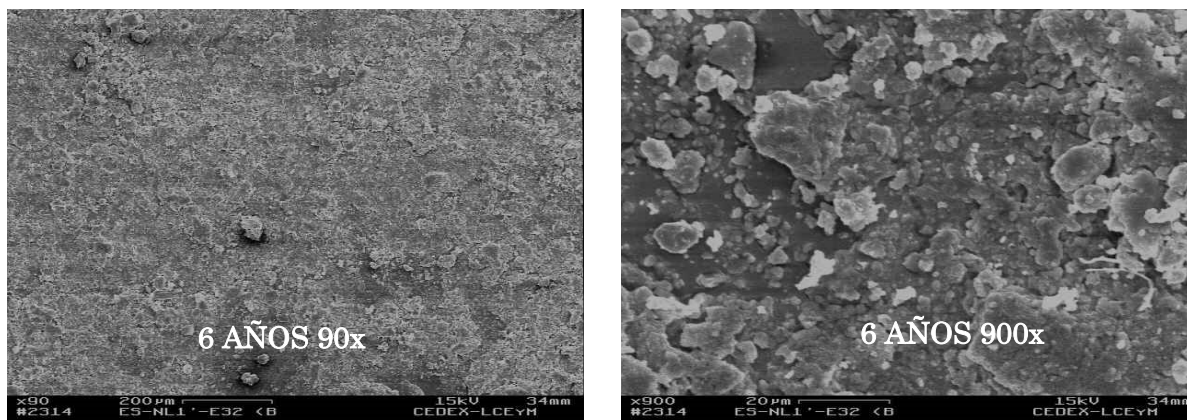


Figura 5.13. Microfotografías MEB a 90x y 900x de la cara externa de la geomembrana a los 6 años de su puesta en obra.

Las microfotografías de las Figuras 5.14 y 5.15 presentan el aspecto de la geomembrana en el seguimiento comprendido entre los 11-13 años y entre los 14-16 años, respectivamente. En el estudio microscópico realizado se detecta que el material polimérico presenta una notable alteración superficial con la aparición de grietas y fisuras muy pronunciadas. Estas se aprecian con más detalle en las microfotografías realizadas a 900x.

La muestra correspondiente a los 16 años presenta un estado superficial bastante degradado observándose una elevada red de microgrietas que originan el desprendimiento del material. La microfotografía a 900x muestra con más detalle las fisuras y grietas de la microestructura polimérica.

Lo expuesto anteriormente indica el estado de degradación de la geomembrana de PVC, debido al efecto de la radiación solar que ha sufrido a lo largo de los 16 años que lleva instalada en el talud del campo experimental de la balsa de El Saltadero.

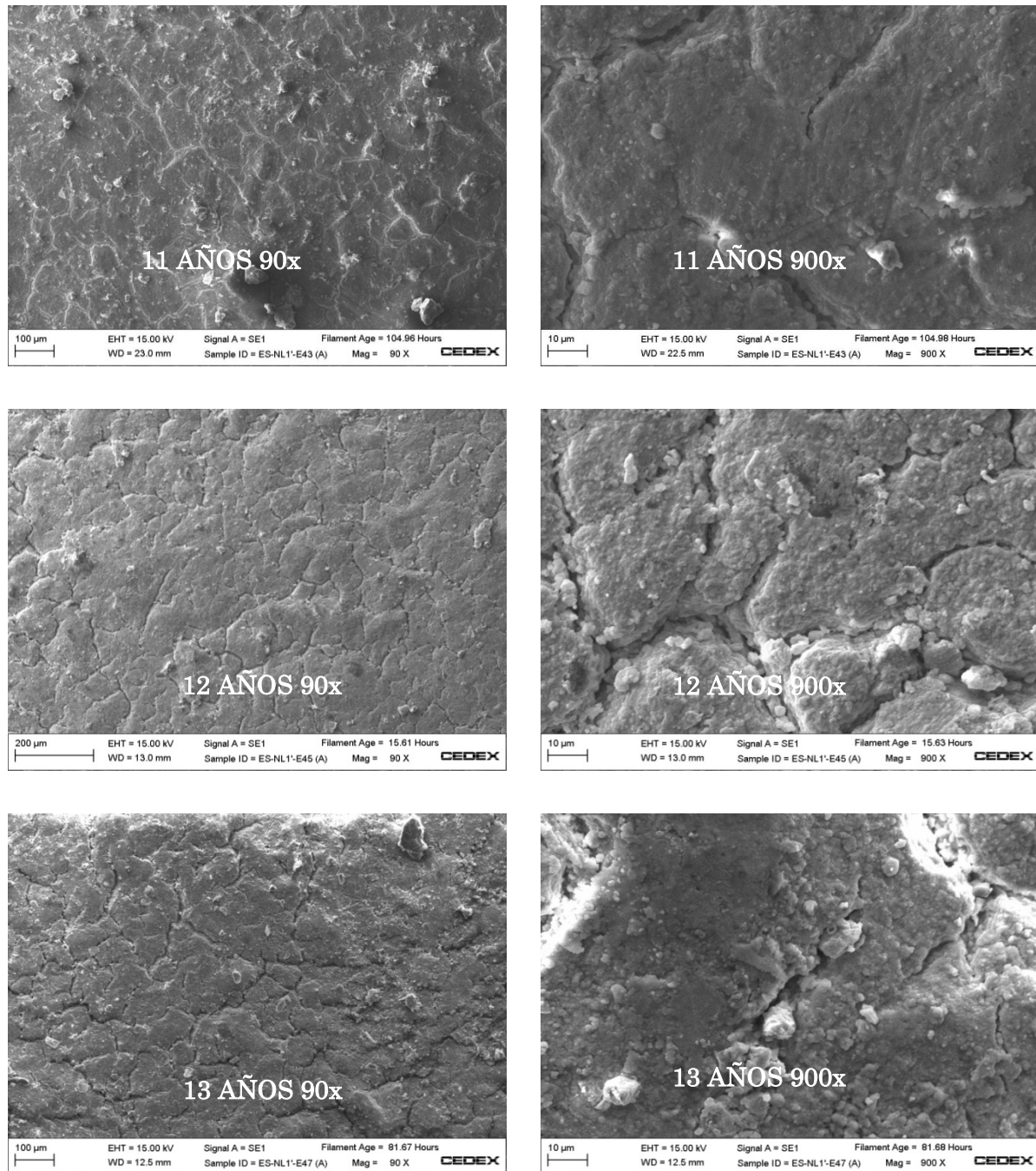


Figura 5.14. Microfotografías MEB a 90x y 900x de la cara externa de la geomembrana a los 11, 12 y 13 años de su puesta en obra.

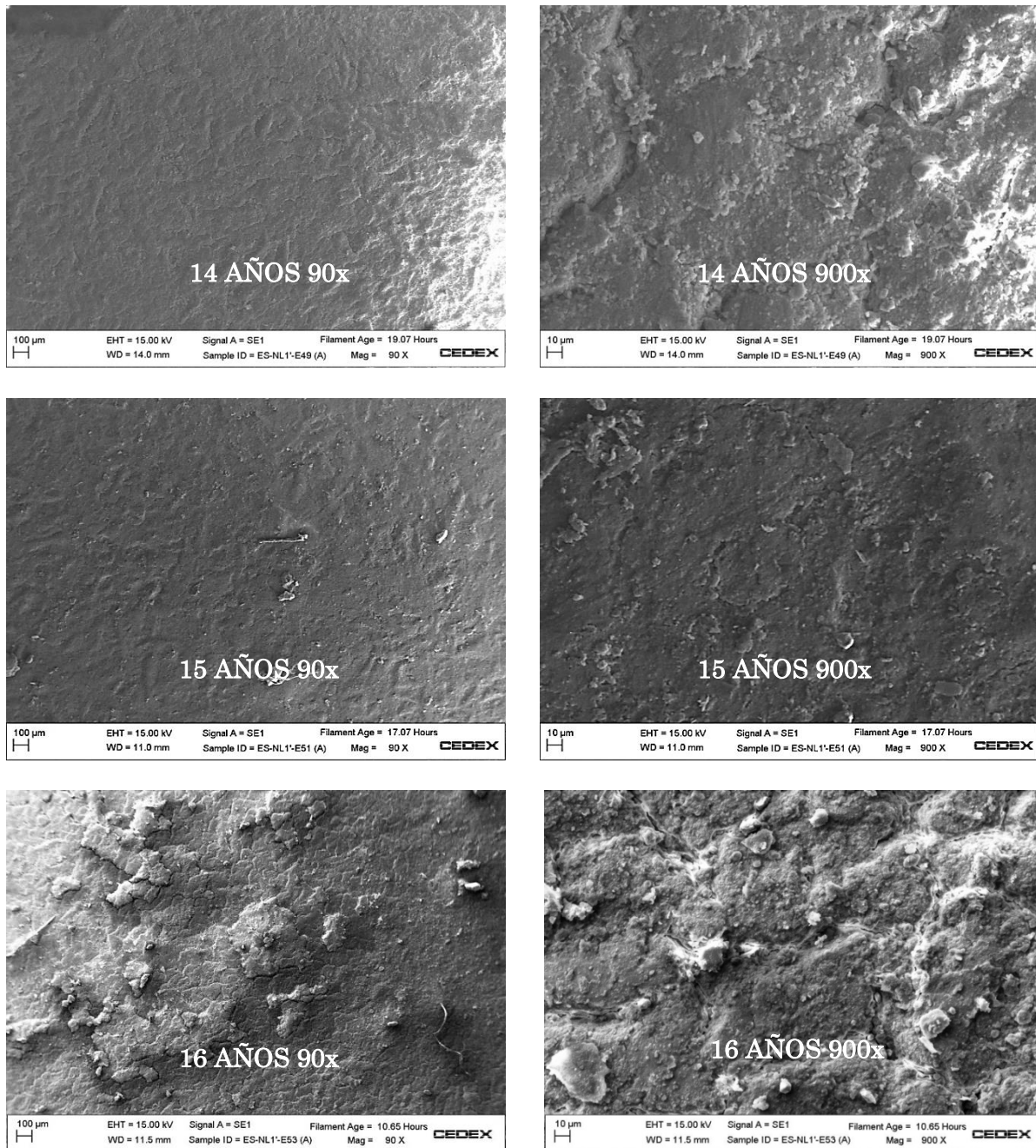


Figura 5.15. Microfotografías MEB a 90x y 900x de la cara externa de la geomembrana a los 14, 15 y 16 años de su puesta en obra.

5.4. DEGRADACIÓN DE LA GEOMEMBRANA DE PVC

La geomembrana instalada en el campo experimental presenta la misma composición que la de balsa de El Saltadero. La determinación cuantitativa y la identificación de los plastificantes de la geomembrana se han expuesto en el capítulo 4 de esta memoria. Los plastificantes identificados fueron seis ftalatos, siendo el ftalato de didecilo y ftalato de isodecilundecilo los de mayor proporción presentes en la geomembrana.

El peso molecular de los plastificantes se calculó aplicando la Ecuación 4.1, definida por Wilson (1995), teniendo en cuenta los seis compuestos identificados, obteniéndose un valor de 448 g/mol. Este peso molecular es superior a 400 g/mol, que es el recomendado por el “PVC Geomembrane Institute” (2004) y por el “Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas” (MARM 2010) para proporcionar una mayor durabilidad de las geomembranas de PVC-P. Stark et al. (2005) consideran que este valor del peso molecular influye positivamente en la retención de los plastificantes en la geomembrana.

Los plastificantes identificados presentan una buena compatibilidad con el PVC, sin embargo se ha observado que el contenido en la geomembrana va disminuyendo gradualmente con el tiempo. A continuación se va a exponer el proceso de pérdida de los plastificantes que experimenta la geomembrana expuesta en el campo experimental y su influencia en las características físicas y mecánicas.

5.4.1. PÉRDIDA DE PLASTIFICANTES

La extracción de plastificantes se llevó a cabo con éter etílico según el método de ensayo descrito en el capítulo 3. La estimación cuantitativa de la pérdida de plastificantes se ha realizado mediante la Ecuación 4.2 (Giroud, 1995).

Los datos obtenidos del contenido y pérdida de plastificantes se representan en la Figura 5.16. Se puede observar como el contenido en plastificantes disminuye gradualmente a lo largo del tiempo pasando de un contenido inicial de 34.3% a 24.6% a los 17 años desde la puesta en obra de la geomembrana. La pérdida de plastificantes obtenida mediante la ecuación de Giroud a los 17 años fue de 37.5%

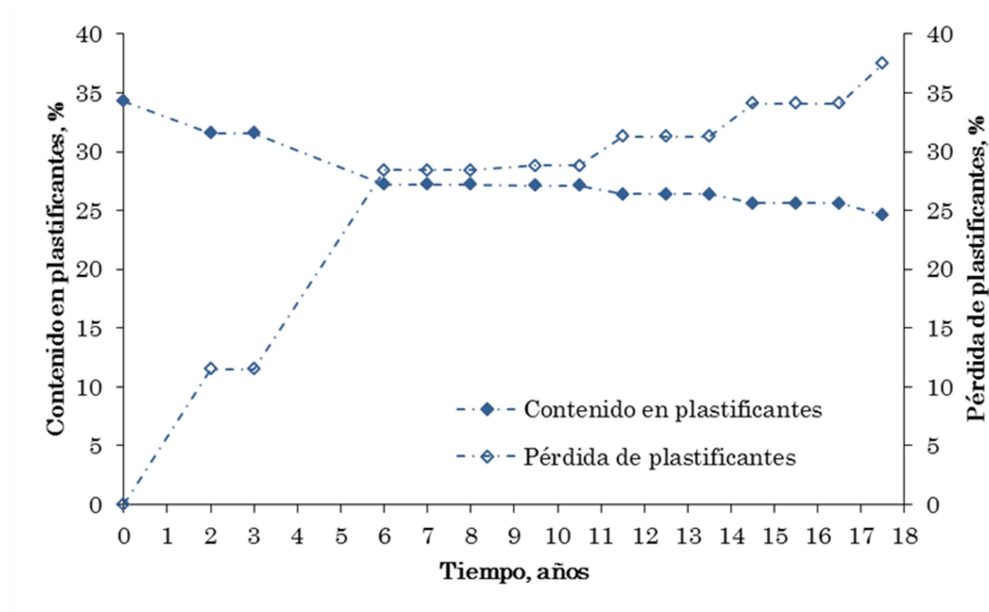


Figura 5.16. Contenido y pérdida de plastificantes en la geomembrana del campo experimental.

La Figura 5.16 muestra como la pérdida de plastificantes tiene lugar de forma escalonada, lo que indica que el contenido en plastificantes no disminuye de una forma lineal a lo largo del tiempo. A los 2 años la geomembrana muestra una pérdida de plastificantes del 11.5%, entre los 6 y 10 años experimenta una pérdida comprendida entre el 28.4% y 28.8%, entre los 11 y 13 años de 31.3% y finalmente entre los 14 y 17 años la pérdida experimentada ha aumentado hasta obtener un valor del 37.5%.

La pérdida de plastificantes en las geomembranas de PVC tiene lugar a través de tres mecanismos diferentes cuando están en contacto con el medio que la rodea: migración al aire o volatilización y migración a líquidos o a sólidos con los que está en contacto directo (Stark et al. 2005).

El proceso de pérdida de plastificantes en la geomembrana de PVC instalada en la balsa de El Saltadero es el de migración al aire por volatilización. Esta migración por volatilización se produce a través de dos procesos de transferencia: difusión del plastificante en el interior de la geomembrana y evaporación del plastificante desde la superficie de la geomembrana al aire.

La velocidad de difusión del plastificante es mayor cuando el contenido en plastificantes es más elevado. Stark et al. (2005) explican este fenómeno a través de la interacción entre las moléculas de plastificante y del polímero. Cuando se produce la migración del plastificante

hacia la superficie de la geomembrana, las fuerzas de Van der Waals hacen que las moléculas de PVC tiendan a acercarse, lo que incrementa la dificultad de su difusión en la geomembrana. Esto conduce a una disminución de migración de los plastificantes hacia la superficie de la geomembrana a lo largo del tiempo. Este proceso de difusión del plastificante puede llegar a interrumpirse quedando una cantidad de plastificante retenida que hace que la geomembrana mantenga un mínimo de flexibilidad.

En la Figura 5.16 se observa este fenómeno de difusión apreciándose una disminución del contenido en plastificantes del 7% en los primeros 6 años; entre los 6 y 11 años decrece 1%, disminución que se repite entre los 11 y 15 años así como en los 2 últimos años del seguimiento de la geomembrana.

La influencia de la orientación en la durabilidad de la geomembrana se pone de manifiesto en la degradación del material polimérico ya que la incidencia de la radiación solar es más elevada en los taludes orientados hacia el sur. Esta influencia ha sido ampliamente estudiada por el grupo de investigación del CEDEX (Aguiar et al. 2003; Blanco 2012, Noval et al. 2014).

La geomembrana del campo experimental está orientada hacia el sur y por tanto afectada por una elevada radiación solar a lo largo del tiempo. Sin embargo, observando los datos de pérdida de plastificantes, se aprecia que a pesar de su orientación, la geomembrana no ha sufrido una excesiva migración de plastificantes por volatilización.

5.5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La pérdida de plastificantes, al ser el proceso de degradación más importante de la geomembrana de PVC, afecta en gran medida a la evolución de sus características físicas y mecánicas dando lugar a la pérdida de flexibilidad de la misma. Este proceso conduce a la disminución de la vida útil de la geomembrana y por tanto a la pérdida de su función como material impermeabilizante.

5.5.1. EVOLUCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS

La primera característica determinada es el espesor medio de la geomembrana. La evolución del mismo está representada en la Figura 5.3 donde se aprecia como el espesor disminuye ligeramente a lo largo del tiempo.

La pérdida de plastificantes conduce a cambios importantes en las características de la geomembrana siendo uno de ellos el cambio de las dimensiones de la misma (Giroud 1995). La disminución del espesor está asociada a la pérdida del material polimérico y de los plastificantes con el tiempo. Este hecho se pone de manifiesto en los resultados obtenidos del espesor de la geomembrana del campo experimental.

La disminución del contenido en plastificantes también se pone de manifiesto en los resultados de la prueba de doblado a bajas temperaturas. Este ensayo, realizado a -20°C, aporta información acerca del estado de la geomembrana de forma que, cuanto menor contenido en plastificantes tiene la geomembrana, más susceptible es a la rotura a bajas temperaturas.

La prueba de doblado realizada ha dado buenos resultados en todas las probetas sometidas al ensayo. Este hecho, junto con el valor del contenido en plastificantes, 24.6% a los 17 años, confirma el buen estado de la geomembrana del campo experimental.

El impacto dinámico llevado a cabo en todas las muestras de la geomembrana de PVC no produjo ninguna perforación al caer el percutor desde una altura de 500 mm. Este resultado se comprobó posteriormente con la prueba de estanqueidad. Los resultados del impacto dinámico se ven afectados por el envejecimiento de la geomembrana, lo que da lugar a que la altura a la que se produce perforación va decreciendo a lo largo del tiempo. En el caso de la geomembrana de PVC del campo experimental, los resultados siguen siendo óptimos, lo que indica que la pérdida de plastificantes, 24.6% a los 17 años, no está afectando a la flexibilidad de la geomembrana.

La evolución de las características mecánicas está representada en las Figuras 5.5 y 5.6. La resistencia a la tracción muestra una tendencia creciente a lo largo del tiempo como consecuencia de la pérdida de plastificantes de la geomembrana. Este hecho conduce a la pérdida de flexibilidad y al aumento de la rigidez de la geomembrana.

Los resultados obtenidos en el alargamiento en la carga máxima no muestran una variación acusada a lo largo de los 16 años. Los datos correspondientes al alargamiento en el sentido longitudinal son menores que los del sentido transversal.

La geomembrana del campo experimental lleva un tejido de hilos sintéticos como material de refuerzo o armadura que es el responsable de los datos alcanzados tanto en la carga como en el alargamiento. La resistencia a la tracción tiende a incrementarse a lo largo del tiempo con la pérdida de plastificantes en cambio la elongación varía muy poco, debido a que el refuerzo, responsable de esta característica, está protegido por la resina. El factor principal del fin de la vida útil de una geomembrana de PVC es la pérdida de plastificantes, sin embargo cuando la geomembrana es reforzada hay que tener muy en cuenta el tejido de su armadura (Blanco et al. 2016).

La evolución de la resistencia a la perforación, Figura 5.7, muestra una tendencia creciente a lo largo del tiempo. El valor inicial es de 415 N/mm y 388 N/mm en la cara externa e interna, respectivamente, alcanzándose unos valores de 578 N/mm y 457 N/mm en la cara externa e interna respectivamente a los 16 años.

Los datos del recorrido del punzón antes de perforar están representados en la Figura 5.8. Estos tienen a disminuir a lo largo del tiempo pasando de unos valores iniciales de 18 mm y 17 mm en la cara externa e interna, respectivamente a 17 mm y 10 mm.

Estos resultados indican que la resistencia a la perforación y el recorrido del punzón evolucionan según lo esperado debido a la pérdida de plastificantes de la geomembrana.

De lo anteriormente expuesto se deduce que la flexibilidad de la geomembrana de PVC-P debida a la presencia de los plastificantes se va perdiendo con el tiempo a medida que éstos aditivos desaparecen. Como consecuencia de este hecho, la geomembrana experimenta una rigidez que se pone de manifiesto en los datos de resistencia a la tracción, alargamiento en la carga máxima, resistencia a la perforación y recorrido del punzón antes de la perforación. Sin embargo, la prueba de doblado a bajas temperaturas en la geomembrana del campo experimental no se ve afectada, todavía, por la pérdida de flexibilidad de la misma. El valor de la pérdida de plastificantes a los 16 años es de 37.5%, el cual no indica una elevada degradación de la geomembrana.

La resistencia de la soldadura por el método de tracción decrece a lo largo del tiempo debido a la pérdida de flexibilidad de la geomembrana (Figura 5.9). Los datos indican que la

soldadura se encuentra en buen estado, no habiéndose detectado ninguna rotura en la zona de unión entre paños.

Respecto a la resistencia de la soldadura por el método de pelado (Figura 5.9) se observa que ésta es prácticamente constante a lo largo de los 16 años de la puesta en obra. Esta determinación proporciona un valor cuantitativo de la resistencia de la soldadura e indica, en este caso, que la geomembrana expuesta en el campo experimental se está comportando de una forma correcta no mostrando signos de deterioro en la zona de la soldadura.

El estudio realizado mediante microscopía óptica y electrónica ha permitido observar la textura y morfología de la geomembrana así como detectar alteraciones en la superficie de la misma que no son visibles por otros procedimientos.

La microscopía óptica ha mostrado la aparición de grietas en la geomembrana a los 11 años de su instalación. Se ha observado cómo estas grietas han ido aumentando a lo largo del tiempo (Figuras 5.10, 5.11 y 5.12).

La microscopía electrónica ha permitido detectar el deterioro de la geomembrana por la aparición de microfisuras y microgrietas en su superficie. Esta degradación se aprecia en las Figuras 5.14 y 5.15. El número y profundidad de las grietas y fisuras han ido en aumento a lo largo de los 16 años de la puesta en obra de la geomembrana. Asimismo se han observado abultamientos y descamaciones del material poliméricos en los últimos seguimientos realizados.

La información aportada por las técnicas microscopía óptica y electrónica pone de manifiesto, que la resina polimérica se encuentra degradada, aunque el contenido en plastificantes de la geomembrana presente un valor todavía elevado para el tiempo que ha transcurrido desde su instalación en el campo experimental.

5.6. BIBLIOGRAFÍA

Aguiar, E., Blanco, M., Soriano, J. y Vara, T. (2003). *Influencia de la orientación en la degradación del poli(cloruro de vinilo) plastificado utilizado como geomembrana sintética en la impermeabilización del embalse de la Tabona*. Ingeniería Civil **130**, 95-103.

Aguiar, E., Vara, T., Blanco, M., García, F., Soriano, J., Castillo, F., Martín, A. y García, C. (2012). *El Saltadero: An experimental field to check the behavior of synthetic geomembranes under weathering exposure*, in Blanco et al. (Eds.) Eurogeo5, Ed. R. B. Servicios Editoriales, S. L.: Vol. 2: 7-14 (electronic proceedings) Valencia, septiembre.

Blanco, M. (2012) *Spanish experience in the use of synthetic geomembranes for hydraulic works*. Keynote Lecture, in Blanco et al. (Eds.) Eurogeo5, Ed. R. B. Servicios Editoriales, S. L., 7-23 (electronic proceedings) Vol. 1: XXI-XXXIX (printed volumes). Valencia, septiembre.

Blanco, M., Aguiar, E., Vara, T., García, F., Soriano, J. y Castillo, F. (2009). *Comportamiento de geomembranas sintéticas instaladas en el campo experimental de El Saltadero*. Ingeniería Civil **153**, 37-44.

Blanco, M., Cea, J.C. y García, F. (2005). *Algunas consideraciones a tener en cuenta a la hora de impermeabilizar una balsa con geomembranas sintéticas*. I Simposio nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas. Sevilla.

Blanco, M., Solera, R., Giroud, J. P., Pérez Sánchez, M., Redón Santafé, M., Sánchez Romero, F. J., Torregrosa Soler, J. B. y Zapata Raboso, F. A. (2016). *Characteristics of six PVC-P geomembranes installed in reservoirs in Spanish Mediterranean Basin*. Eurogeo6. 600-608. Ljubljana, september.

Crespo M. A. (2016). *Waterproofing geomembranes life expectancy: effect of a pigmented coating*. Eurogeo6. 391-402. Ljubljana, septiembre.

Giroud, J. P. (1995). *Evaluation of PVC geomembrane shrinkage due to plasticizer loss*. Geosynthetics International, **2**(6), 1099-1113.

International Commission on Large Dams, ICOLD (2010). *Geomembrane Sealing Systems for Dams. Design principles and review of experience*. Bulletin **135**. París.

Koerner, R. M. (1999). *Designing with Geomembranes*. Prentice Hall: 292, 4th edition. Englewood Cliffs, (USA).

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2010). *Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas*. Ed. Comité Nacional Español de Grandes Presas.

Noval, A.M., Blanco, M., Castillo, F., Leiro, A. Mateo, B, Giroud, G.P., Aguiar, E., Torregrosa, J.B. y Sánchez, F.J. (2014). *Influence of orientation on ageing of a reinforced PVC geomembrane*. 10th International Conference on Geosynthetics. Berlin, septiembre.

PVC Geomembrane Institute (PGI) (2004). *PVC Geomembrane Material Specification 1104*. University of Illinois, Urbana, IL, www.pvcgeomembrane.com, 1 January 2004.

Stark, T. D., Choi, H. y Diebel, P. W. (2005). *Influence of plasticizer molecular weight on plasticizer retention in PVC geomembranes*. Geosynthetics International, **12**, 99-110.

Wilson, A. S. (1995). *Plasticizers: principles and practice*. The Institute of Materials.

**CAPÍTULO 6. ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS
GEOMEMBRANAS DE PVC-P INSTALADAS
EN LA Balsa DE EL SALTADERO Y
EN EL CAMPO EXPERIMENTAL**

CAPÍTULO 6. ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS GEOMEMBRANAS DE PVC-P INSTALADAS EN LA Balsa DE EL SALTADERO Y EN EL CAMPO EXPERIMENTAL

6.1. INTRODUCCIÓN

El estudio de las características determinadas en las geomembranas de PVC-P instaladas en la balsa cubierta de El Saltadero y en el campo experimental ha quedado expuesto en los capítulos 4 y 5 de esta memoria. En ellos se ha analizado el comportamiento de las dos geomembranas en función de la variación de sus características físico-químicas, mecánicas y microscópicas. Asimismo, se ha analizado la degradación de las dos geomembranas en función de la pérdida de plastificantes, que es el proceso más importante de degradación de las geomembranas de PVC-P.

En este capítulo se compara el comportamiento de las geomembranas de PVC-P instaladas en la balsa cubierta de El Saltadero y la instalada en el campo experimental. Esta comparación se ha realizado con los datos obtenidos de la zona de coronación de los taludes norte y sur de la balsa de El Saltadero por ser la zona que ha experimentado los cambios más significativos en todas las características determinadas.

6.2. ESTUDIO DE LA DEGRADACIÓN DE LAS GEOMEMBRANAS DE PVC-P

6.2.1. PÉRDIDA DE PLASTIFICANTES

El contenido en plastificantes de las dos geomembranas de PVC-P se muestra en la Tabla 6.1. En ella se presentan los datos de la zona de coronación del talud norte y sur de la geomembrana de la balsa de El Saltadero y del campo experimental.

Se observa como la disminución del contenido en plastificantes es más acusada en la geomembrana instalada en la balsa de El Saltadero. Inicialmente el contenido en plastificantes es de 34.3% disminuyendo hasta un 16.1% y 18.1% a los 17 años de su puesta en obra en la zona de coronación en los dos taludes de la balsa, mientras que el alcanzado en el campo experimental es de 24.6%.

Tabla 6.1. Contenido en plastificantes en las dos geomembranas de PVC-P

TIEMPO DE INSTALACIÓN, AÑOS	CONTENIDO EN PLASTIFICANTES, %		
	Balsa El Saltadero		CAMPO EXPERIMENTAL
	NORTE CORONACIÓN	SUR CORONACIÓN	
0	34.3	34.3	34.3
1	31.7		-
2	31.7		31.6
3	-	32.2	31.6
4	-	31.0	31.0
5	-	31.0	31.0
6	28.1		27.2
7	26.2		27.2
8	-	26.6	27.2
9	-	26.6	27.1
10	-	24.3	27.1
11	-	19.1	26.4
12	22.3	19.1	26.4
13	22.3	18.6	26.4
14	18.1	18.4	25.6
15	16.1	18.4	25.6
16	16.1	18.4	25.6
17	16.1	18.1	24.6

La Figura 6.1 representa la evolución del contenido en plastificantes en las dos geomembranas. Se observa como la geomembrana de PVC-P de la Balsa de El Saltadero tiene menor contenido en plastificantes, mostrando un salto cuantitativo a los 13 años de su instalación. Sin embargo la geomembrana instalada en el campo experimental muestra un

contenido en plastificantes superior siendo su disminución más gradual a lo largo de los 17 años de su puesta en obra.

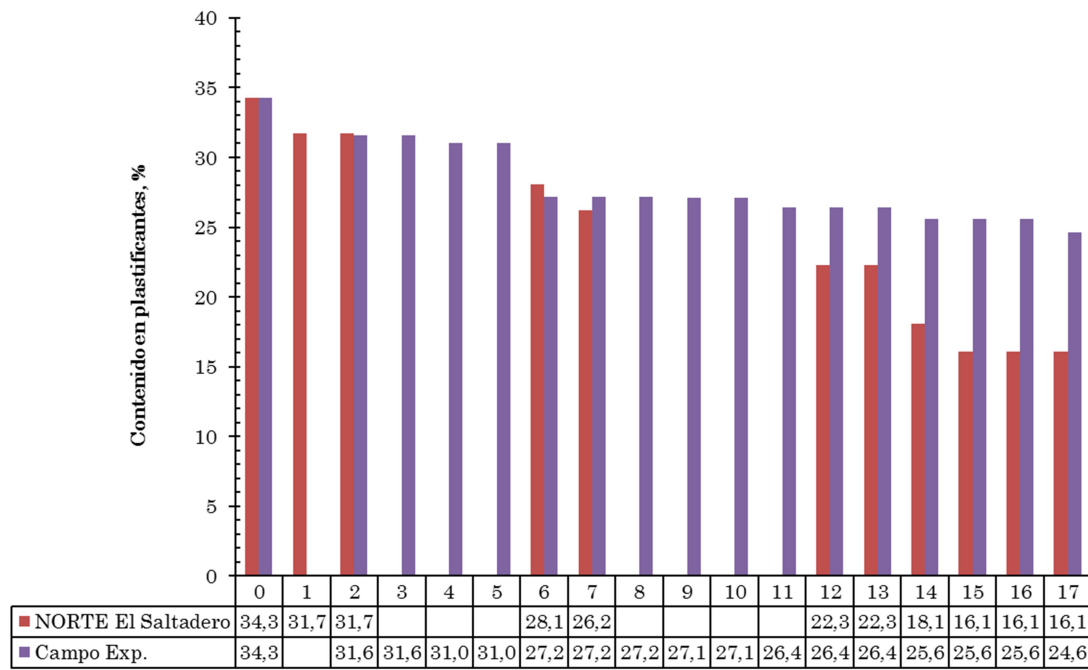


Figura 6.1. Evolución del contenido en plastificantes de la geomembrana de la balsa de El Saltadero, talud norte, y del campo experimental.

La Figura 6.2 representa la evolución del contenido en plastificantes en los taludes norte y sur de la balsa de El Saltadero junto con el contenido en el campo experimental. Se aprecia que las muestras con menos contenido son las de la geomembrana instalada en el interior de la balsa. El contenido en plastificantes en la geomembrana de la balsa de El Saltadero pasa inicialmente de 34.3% a un 16.1% y 18.1% en los taludes norte y sur, respectivamente, a los 17 años de su puesta en obra. Sin embargo en la geomembrana del campo experimental se alcanza un 24.6% a los 17 años.

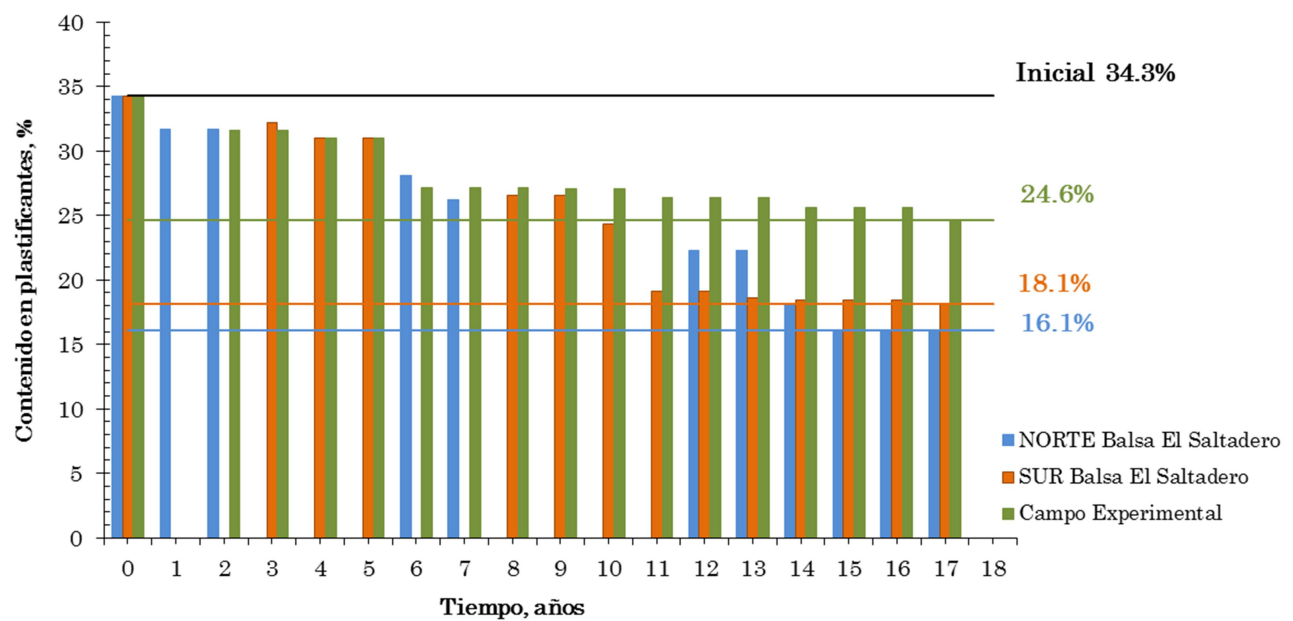


Figura 6.2. Evolución del contenido en plastificantes de la geomembrana de la balsa de El Saltadero, talud norte y sur, y del campo experimental.

La pérdida de plastificantes en las dos geomembranas, calculada con la ecuación de Giroud (Ecuación 4.2) se ha representado en la Figura 6.3. En ella se compara la pérdida de plastificantes sufrida en el talud norte de la geomembrana de la balsa de El Saltadero con la del campo experimental. Se puede observar la gran diferencia que presentan las dos láminas de PVC-P, 63.2% en la lámina instalada en el interior de la balsa frente al 37.5% en la expuesta en el campo experimental.

Si se compara la pérdida de plastificantes sufrida en los dos taludes de la geomembrana ubicada en el interior de la balsa y la del campo experimental (Figura 6.4), se observa que esta característica muestra el siguiente orden:

$$\text{Campo Experimental} < \text{Talud sur de la balsa} < \text{Talud norte de la balsa}$$

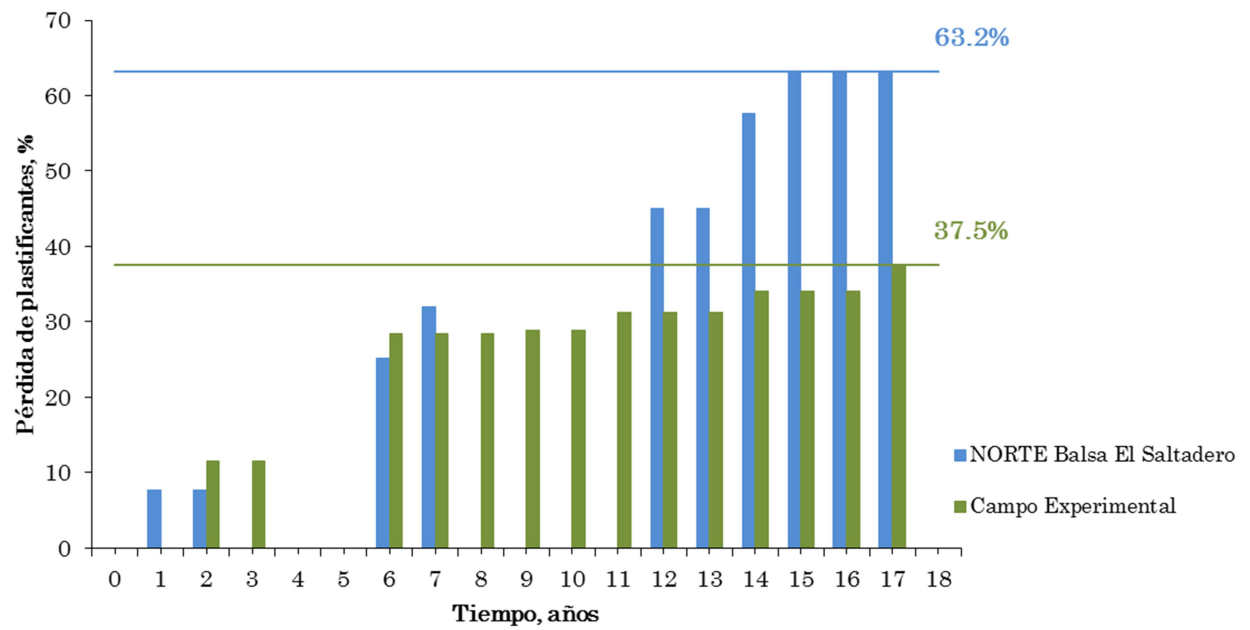


Figura 6.3. Pérdida de plastificantes del talud norte de la balsa de El Saltadero y del campo experimental.

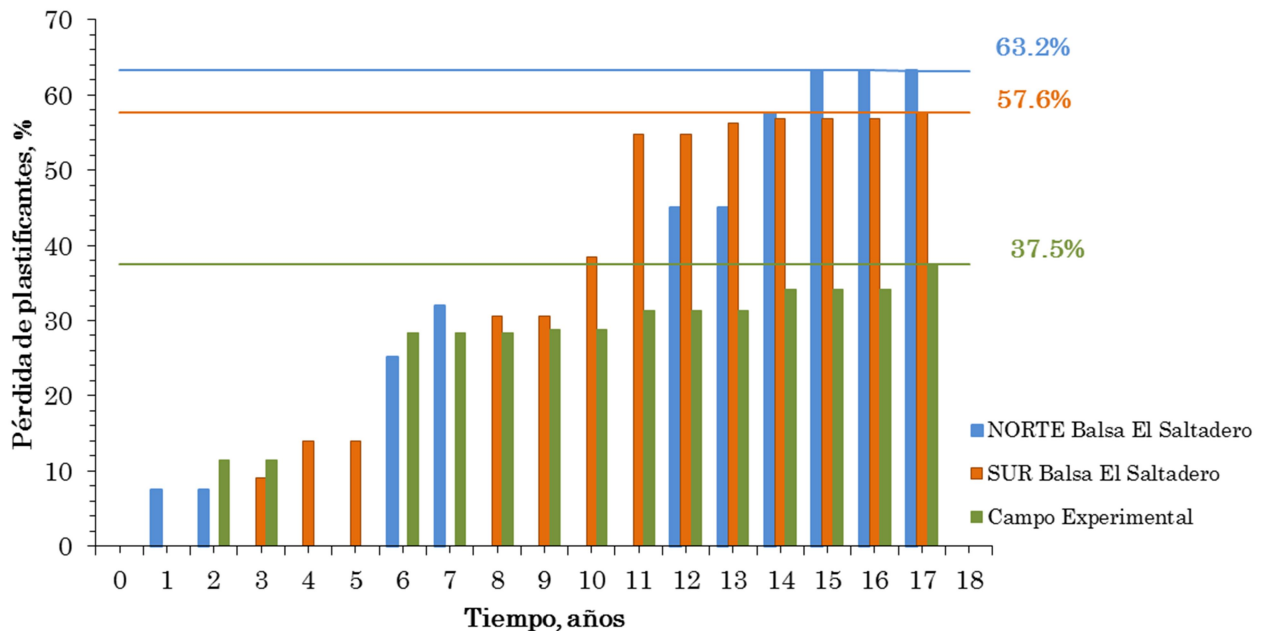


Figura 6.4. Pérdida de plastificantes en los dos taludes de la balsa de El Saltadero y del campo experimental.

De todo lo expuesto se aprecia como los plastificantes han sufrido una pérdida elevada en la geomembrana de la balsa de El Saltadero, protegida por la cobertura de sombreo, frente a la situada en el talud norte del campo experimental.

6.2.2. ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS

6.2.2.1. Espesor

La variación del espesor de las geomembranas se ve afectada por la pérdida de plastificantes ya que la disminución de estos aditivos conduce a un cambio en las dimensiones de las mismas (Giroud 1995). En las Figuras 4.6 y 4.7 se ha representado la variación del espesor en los taludes norte y sur de la balsa de El Saltadero y en la Figura 5.1 la evolución del espesor en el campo experimental. En todas las representaciones se observa como el espesor medio de la geomembrana experimenta una disminución como consecuencia de la pérdida de plastificantes y de resina a lo largo del tiempo siendo la disminución más acusada en la zona de coronación del talud norte de la balsa de El Saltadero.

6.2.2.2. Doblado a bajas temperaturas

La prueba de doblado a bajas temperaturas realizada en las dos geomembranas de PVC-P ha conducido a resultados diferentes. La lámina de la balsa de El Saltadero experimentó la rotura en las probetas ensayadas a -20°C a los 14 años de su puesta en obra mientras que la lámina del campo experimental ha experimentado la aparición de grietas a los 16 años.

Esto indica que la geomembrana de la balsa de El Saltadero se encuentra más degradada que la del campo experimental como consecuencia de la mayor pérdida de plastificantes.

6.2.2.3. Resistencia al impacto dinámico

Los resultados alcanzados en el impacto dinámico son óptimos en las dos geomembranas de PVC-P, no produciéndose ninguna perforación al caer el percutor desde una altura de 500 mm. Este resultado se comprobó posteriormente con la prueba de estanqueidad.

Los resultados del impacto dinámico se ven afectados por el envejecimiento de la geomembrana, debido a que se pierde flexibilidad y aumenta la rigidez de la misma. Esto

conduce la perforación tiene lugar a alturas de caída del percutor cada vez menores. Sin embargo, a pesar de su deterioro, la geomembrana de la balsa de El Saltadero presenta una buena resistencia al impacto dinámico.

6.2.2.4. Resistencia a la tracción y alargamiento

La evolución de la resistencia a la tracción y alargamiento en la carga máxima se representa en las Figuras el 6.5 y 6.6. Se observa como los datos de resistencia a la tracción en la geomembrana de la balsa de El Saltadero son superiores a los del campo experimental. Este incremento de valores se produce tanto en el sentido longitudinal como en el transversal.

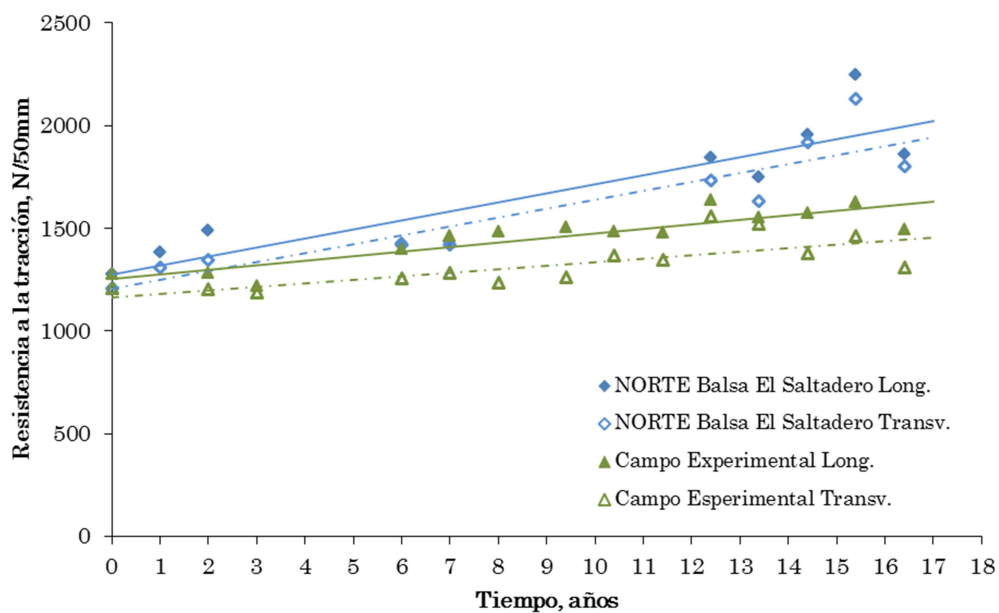


Figura 6.5. Resistencia a la tracción de la geomembrana de la balsa de El Saltadero y el campo experimental.

Respecto al alargamiento en la carga máxima, no hay una diferencia apreciable entre las dos geomembranas. La evolución de esta característica se mantiene prácticamente constante a lo largo del tiempo.

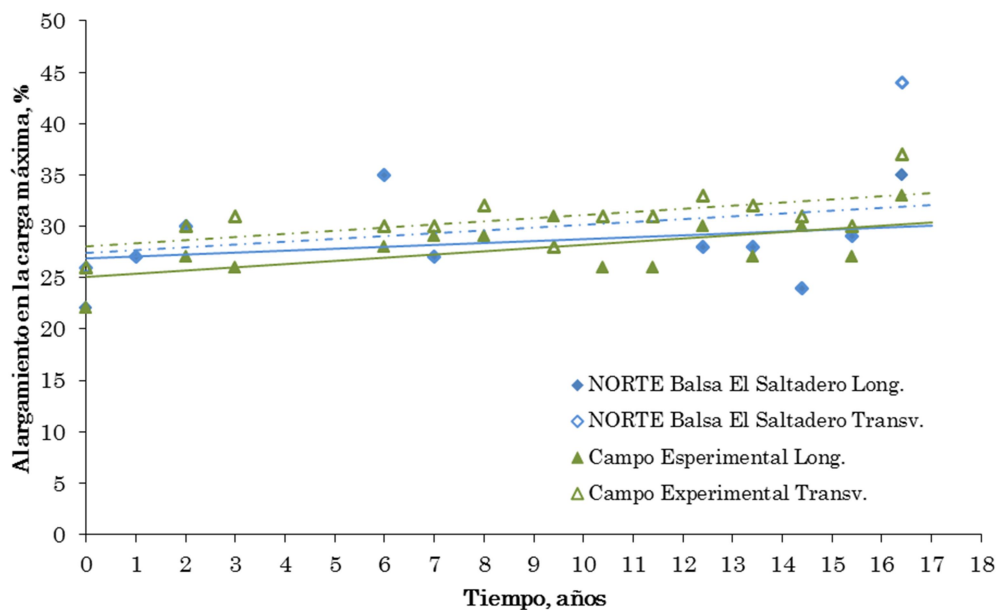


Figura 6.6. Alargamiento en la carga máxima en la balsa de El Saltadero y el campo experimental.

Se han analizado los datos iniciales de resistencia a la tracción y alargamiento en la carga máxima y los obtenidos a los 15 años desde la puesta en obra de las dos geomembranas. En la Tabla 6.2 se exponen los resultados de estas características mecánicas observándose como los valores alcanzados en la geomembrana de la balsa de El Saltadero son mucho más elevados que los del campo experimental.

La elevada resistencia a la tracción que muestra la geomembrana de la balsa de El Saltadero indica una pérdida de flexibilidad y aumento de la rigidez de la misma como consecuencia de la pérdida de plastificantes, 63.2% a los 15 años.

La geomembrana del campo experimental ha sufrido una pérdida de plastificantes del 34.1% a los 15 años. Esta menor pérdida se pone de manifiesto en los datos obtenidos en la resistencia a la tracción, 1621 N/50mm y 1459 N/50mm en ambos sentidos, respectivamente.

En ambas geomembranas, cubierta y expuesta a las radiaciones solares, todavía se conserva la resina de PVC que protege al tejido de poliéster. Este geotextil es el responsable del alargamiento, por lo que esta característica no experimenta con el tiempo unas variaciones notables. Lo hará en el momento en que el refuerzo quede al descubierto y sea

atacado por las radiaciones UV. A partir de ese instante caerán notablemente tanto la resistencia a la tracción como el alargamiento.

Tabla 6.2. Datos de la resistencia a la tracción y alargamiento en la carga máxima de la geomembrana del campo experimental y de la balsa de El Saltadero los 15 años.

CARACTERÍSTICA	INICIAL	CAMPO EXPERIMENTAL	CORONACIÓN		INTERMEDIA	
			NORTE	SUR	NORTE	SUR
Resistencia a la tracción, N/50mm						
Longitudinal	1270	1621	2243	1966	2128	1918
Transversal	1205	1459	2127	1851	1906	1791
Alargamiento en la carga máxima, %						
Longitudinal	22	27	29	30	28	28
Transversal	26	30	34	36	34	34

6.2.2.5. Resistencia a la perforación y recorrido del punzón antes de la perforación

La Figura 6.7 representa la variación de la resistencia a la perforación en las dos geomembranas a lo largo del tiempo. Los resultados muestran un aumento considerable de la resistencia a la perforación en la zona de coronación del talud norte de la balsa tanto en la cara externa como en la interna. Sin embargo la evolución de esta característica en la geomembrana del campo experimental muestra una tendencia creciente menos acusada.

La resistencia a la perforación en la geomembrana de la balsa de El Saltadero pasa de un valor de 415 N/mm y 388 N/mm en su cara externa e interna, respectivamente, a 715N/mm y 554N/mm a los 16 años, en ambas caras, respectivamente. En la geomembrana del campo experimental se pasa de un valor inicial de 415N/mm y 388N/mm en la cara externa e interna, respectivamente, a 578 N/mm y 457 N/mm, en ambas caras, respectivamente.

Los resultados obtenidos en el recorrido del punzón antes de perforar (Figura 6.8) siguen una evolución acorde a lo esperado observándose que en la geomembrana de la balsa de El Saltadero esta característica disminuye de una forma más acusada que la del campo experimental. Este hecho se aprecia en las dos caras de la geomembrana.

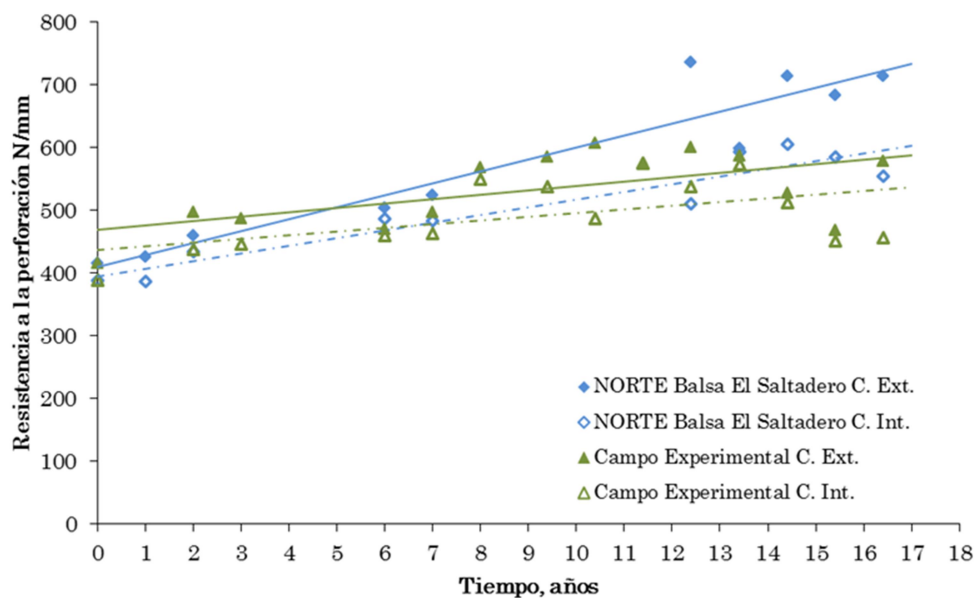


Figura 6.7. Evolución de la resistencia a la perforación en la balsa de El Saltadero y en el campo experimental.

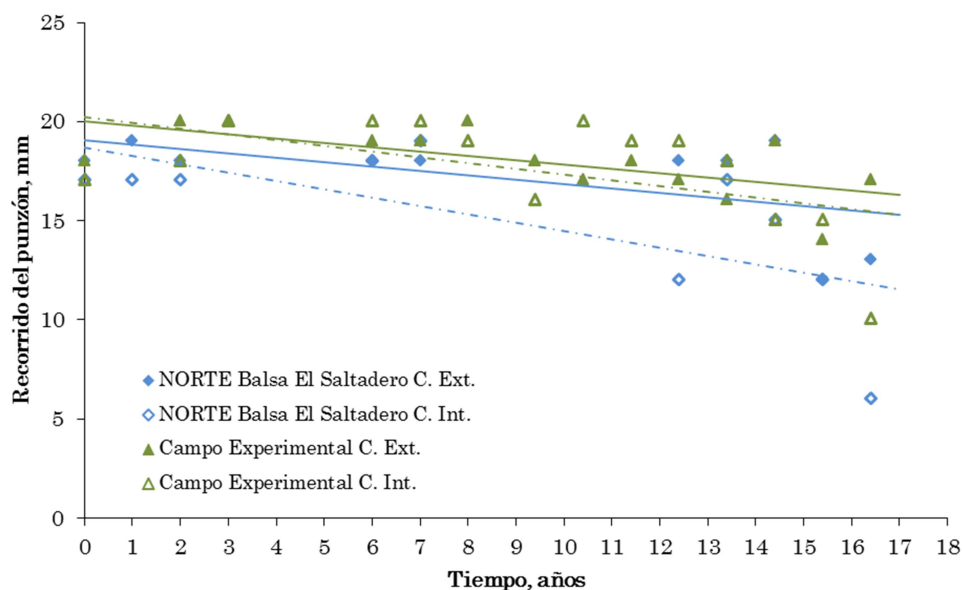


Figura 6.8. Evolución del recorrido del punzón en la balsa de El Saltadero y en el campo experimental.

Se han analizado los datos iniciales de la resistencia a la perforación y recorrido del punzón y los alcanzados a los 15 años de la puesta en obra de las dos geomembranas de PVC. En la Tabla 6.3 se presentan los resultados de estas características observándose que la resistencia a la perforación de la geomembrana de la balsa de El Saltadero alcanza unos valores superiores a los del campo experimental.

Los resultados del recorrido del punzón muestran una disminución a lo largo del tiempo siendo más notoria en la zona de coronación del talud norte de la balsa de El Saltadero.

De lo anteriormente expuesto se deduce que la flexibilidad de la geomembrana de PVC-P debida a la presencia de los plastificantes se va perdiendo con el tiempo a medida que éstos aditivos desaparecen. Como consecuencia de este hecho la geomembrana experimenta una rigidez que se pone de manifiesto en los datos de resistencia a la tracción, doblado a bajas temperaturas, resistencia a la perforación y recorrido del punzón antes de la perforación.

Tabla 6.3. Datos de la resistencia a la perforación y recorrido del punzón antes de perforar, de la geomembrana del campo experimental y de la balsa de El Saltadero los 15 años.

CARACTERÍSTICA	INICIAL	CAMPO EXPERIMENTAL	CORONACIÓN		INTERMEDIA	
			NORTE	SUR	NORTE	SUR
Resistencia a la perforación, N/mm						
Cara externa	415	601	684	628	709	720
Cara interna	388	537	586	516	740	501
Recorrido del punzón, mm						
Cara externa	18	14	12	18	17	18
Cara interna	17	15	12	16	17	13

6.2.2.6. Resistencia de la soldadura

Los datos obtenidos en la determinación de la resistencia de la soldadura por el método de tracción y pelado se representan en la Figura 6.9. Se puede observar que la resistencia de la soldadura por el método de tracción experimenta una tendencia creciente en las dos geomembranas, siendo los valores de la balsa de El Saltadero superiores a los del campo experimental.

En el caso de la resistencia de la soldadura por el método de pelado, se aprecia una tendencia decreciente más acusada en la geomembrana de la balsa de El Saltadero. Por el contrario, los resultados alcanzados en la del campo experimental se mantienen prácticamente constantes a lo largo de los 16 años de su puesta en obra.

La unión entre paños entre las láminas que impermeabilizarán el vaso del embalse se irá haciendo más débil con el paso del tiempo, por tanto la resistencia al pelado tenderá a disminuir.

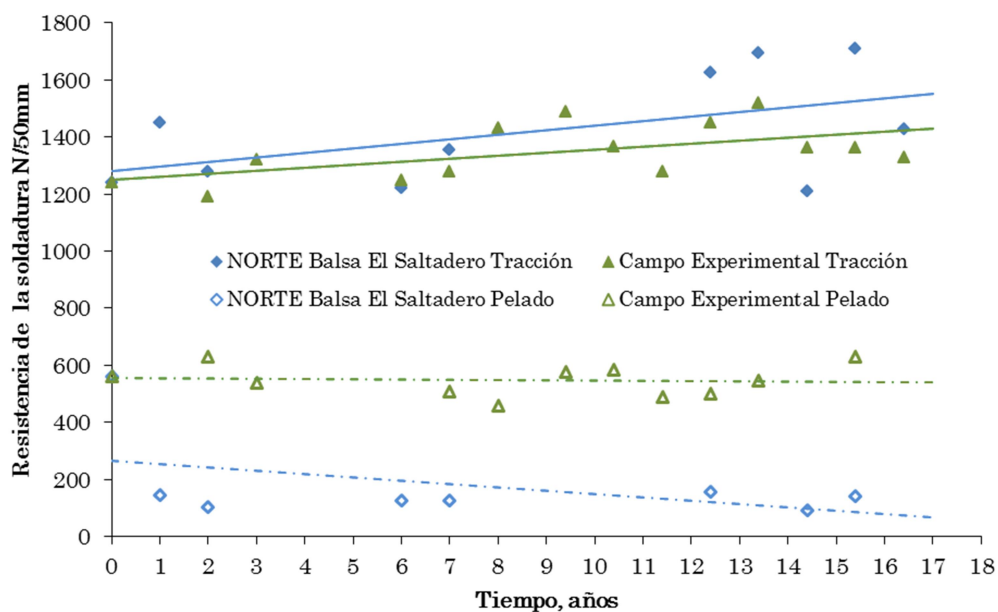


Figura 6.9. Evolución de la resistencia de la soldadura en la balsa de El Saltadero y en el campo experimental.

6.2.2.7. Microscopia óptica y electrónica

Con el fin de realizar un estudio comparativo más detallado se exponen las microfotografías realizadas por microscopia óptica y electrónica más representativas de las dos geomembranas.

En la Figura 6.10 se exponen las microfotografías tomadas por MOR a 60x de las dos geomembranas en su cara externa. Se han seleccionado las microfotografías más significativas para mostrar el avance de la degradación superficial de las geomembranas, por ello se exponen las realizadas en los seguimientos correspondientes a los 7, 10 y 16 años de la puesta en obra de ambas geomembranas.

La geomembrana de balsa de El Saltadero muestra una superficie homogénea sin alteraciones superficiales apreciables.

La geomembrana del campo experimental presenta la aparición de grietas y fisuras a los 10 años, lo que indica que comienza a degradarse superficialmente. A los 16 años se puede ver cómo éstas han adquirido un mayor tamaño formando una elevada red de microgrietas.

En la Figura 6.11 se exponen las microfotografías tomadas por MEB a 900x de las dos geomembranas, en su cara externa. Las microfotografías seleccionadas corresponden a los seguimientos realizados a los 7, 10 y 16 años de la instalación de ambas geomembranas.

La geomembrana de la balsa de El Saltadero muestra, en su cara externa, descamaciones y oquedades no observándose fisuras ni grietas en el seguimiento correspondiente a los 7 años. En las microfotografías de los seguimientos a los 10 y 16 años se aprecian microfisuras y microgrietas así como oquedades y microporos en toda la superficie de la geomembrana. En el material extraído a los 16 años aparecen deposiciones de residuos sólidos así como restos de frústulas que proceden de una variedad de microalgas denominadas diatomeas. La frústula es la pared celular de la capa externa de la diatomea y está compuesta casi en su totalidad por sílice (Noval 2015).

La lámina del campo experimental presenta una alteración superficial con la aparición de grietas y fisuras superficiales en el seguimiento realizado a los 7 años. En la microfotografía de los 10 años se puede comprobar una notable alteración del material apreciándose un elevado cuarteamiento en la superficie de la geomembrana.



Figura 6.10. Microfotografías MOR 60x de las geomembranas de la balsa de El Saltadero y del campo experimental a diferentes años.

La muestra correspondiente a los 16 años presenta un estado superficial bastante degradado observándose una abundante red de microgrietas que originan un elevado cuarteamiento en la geomembrana.

Los resultados alcanzados mediante el estudio microscópico indican el estado de degradación de las dos geomembranas de PVC-P, observándose un mayor deterioro en la

geomembrana del campo experimental. Esto es debido al efecto de la radiación solar que ha sufrido a lo largo de los 16 años desde su instalación en el campo experimental de la balsa de El Saltadero.

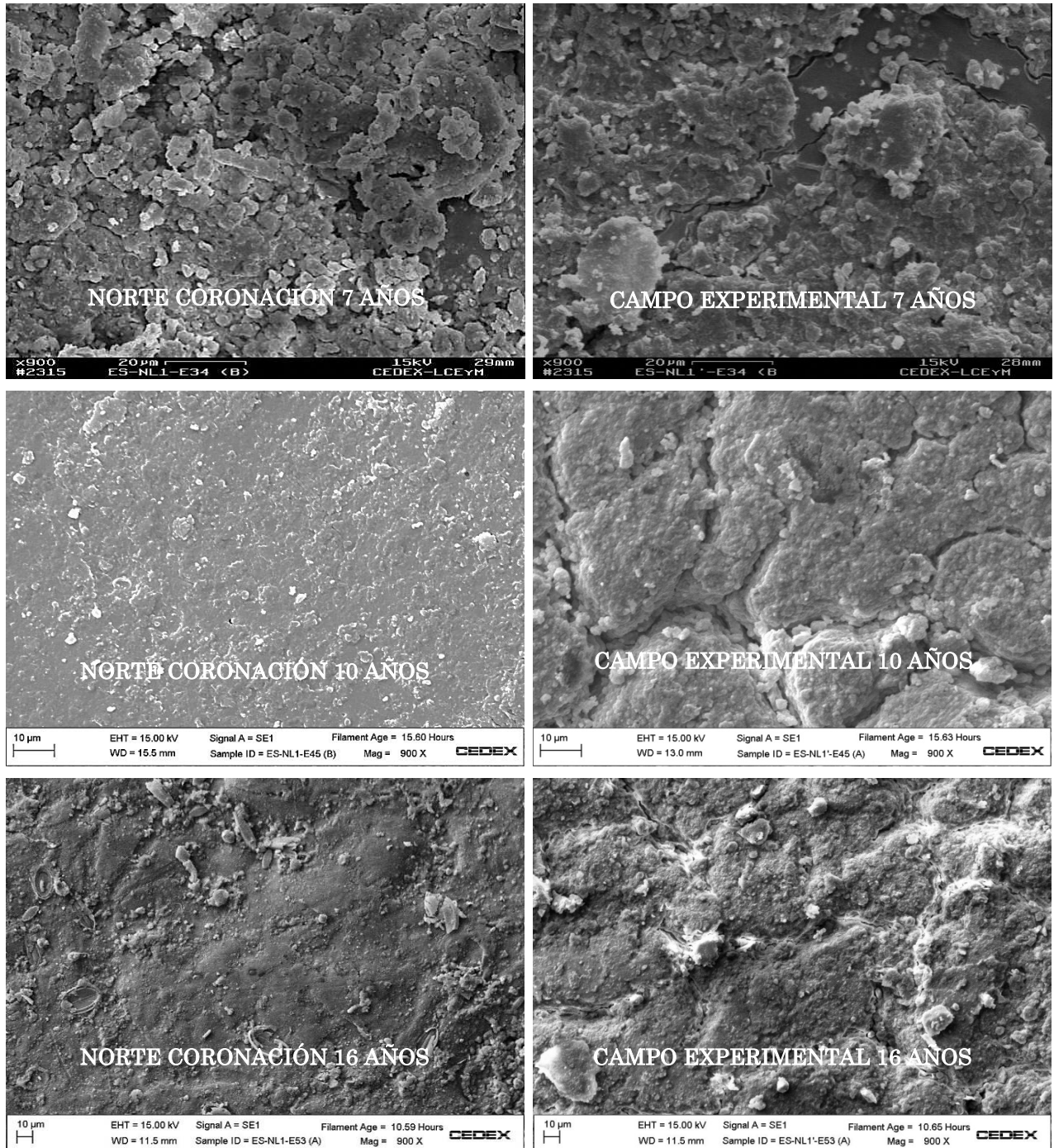


Figura 6.11. Microfotografías MEB 900x de la balsa de El Saltadero y del campo experimental a diferentes años.

6.3. CONCLUSIONES

Las propiedades de las geomembranas de PVC-P derivan del porcentaje de resina y aditivos presentes en su formulación. De todos estos aditivos de las geomembranas, los plastificantes son los que desempeñan una de las funciones más importantes en cuanto a las variaciones de las propiedades físicas y mecánicas del PVC-P.

No obstante, el contenido en plastificantes es una de las características que se ve muy afectada por la exposición de la geomembrana a los agentes atmosféricos. Por este motivo, la variación del contenido en plastificantes, en particular su disminución, representa un índice significativo de la degradación del PVC-P, ya que pone de manifiesto la pérdida de propiedades que fueron alcanzadas gracias a su adición en la formulación de las geomembranas (Cazzuffi 2013).

Numerosos estudios han mostrado que la degradación de las geomembranas y por tanto del sistema de impermeabilización, depende en gran medida de factores externos como la temperatura que sufre la geomembrana, la radiación UV a la que está expuesta y el tiempo de instalación de la misma (Bartolomeo 2003, Girard et al. 2002, Koerner y Hsuan 2003).

Los resultados obtenidos en el estudio comparativo de las dos geomembranas de PVC-P, indican que la mayor pérdida de plastificantes ha sido experimentada por la geomembrana situada en el embalse cubierto de El Saltadero, protegida por una cobertura de sombreo. Por el contrario, la lámina expuesta a la intemperie en el campo experimental ha mostrado una menor pérdida de plastificantes a lo largo del tiempo.

Esta pérdida se ha puesto de manifiesto en las características físicas y mecánicas de las dos geomembranas, apreciándose una mayor pérdida de flexibilidad y un aumento de la rigidez en la geomembrana de la balsa cubierta de El Saltadero.

Es de destacar que la geomembrana de la balsa cubierta de El Saltadero sigue cumpliendo su función impermeable a lo largo de los 17 años de su puesta en obra.

6.4. BIBLIOGRAFÍA

Bartolomeo, P. (2003). *Vers une prévision de la durée de vie des polymères géosynthétiques. Principes de base – État de l'art*. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 243, réf. 4456, 47-69.

Cazzuffi, D. (2013). *Long time Behaviour of exposed geomembranes used for the upstream face rehabilitation of concrete and masonry dams*. Proc. Congreso Geosintec Iberia 1, 26-36. Sevilla, noviembre.

Girard H., Poulain D., Benetton J-P., Fayoux D. (2002). *Durability of PVC-P geomembranes used in hydraulic structures: feedback on experience*. Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics, Nice. 709-712.

Giroud, J. P. (1995). *Evaluation of PVC geomembrane shrinkage due to plasticizer loss*. Geosynthetics International, **2**(6), 1099-1113.

Koerner R.M., Hsuan G. (2003). *Lifetime Prediction of Polymeric Geomembranes Used in New Dam Construction and Dam Rehabilitation*. Proceedings Assoc. State Dam Officials Conference, Lake Harmony.

Noval, A. M. (2015). *Estudio del comportamiento de tres geomembranas de EPDM, PVC-P y PEAD a lo largo del tiempo*. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III, Madrid.

CAPÍTULO 7. OTROS MATERIALES

CAPÍTULO 7. OTROS MATERIALES

7.1. INTRODUCCIÓN

El estudio de las geomembranas impermeabilizantes en las balsas situadas en las Islas Canarias ha conducido a lo largo de los años a conocer mejor el comportamiento de los diferentes materiales poliméricos empleados en esta aplicación. El grupo de investigación del Área de Materiales del CEDEX tiene gran experiencia en el estudio del comportamiento de geomembranas de distinta naturaleza instaladas en balsas comunes, es decir, donde la geomembrana está expuesta a las radiaciones solares (Crespo 2011, Noval et al. 2014, Blanco 2012, Blanco et. al 2014). En los últimos años se está llevando a cabo la investigación en geomembranas instaladas en balsas cubiertas, las cuales no están expuestas a la radiación solar, obteniendo para el caso de las geomembranas de PVC resultados verdaderamente sorprendentes (Blanco et al. 2013).

En este capítulo se expone el estudio realizado en las geomembranas de polietileno de alta densidad (PEAD) y etileno-propileno-dieno (EPDM) instaladas en embalses cubiertos y en embalses comunes, en los que la geomembrana está expuesta a la radiación solar.

7.2. LAS GEOMEMBRANAS Y LOS EMBALSES

Los embalses seleccionados para realizar el estudio y poder establecer la diferencia de comportamiento entre las geomembranas expuestas a la intemperie y en el interior de los mismos, son los siguientes:

Geomembrana de EPDM:

Embalse cubierto: *RAVELO*

Embalse común: *LOS DOS PINOS*

Geomembrana de PEAD:

Embalse cubierto: *SAN LORENZO*

Embalse común: *CUATRO CAMINOS*

Los embales de Ravelo y San Lorenzo están situados en la isla de Tenerife y los embalses de Los Dos Pinos y Cuatro Caminos están situados en la isla de La Palma. Las Islas Canarias presentan un índice máximo de radiación UV elevado, con un valor comprendido entre 6.5 y 8.5, considerando una escala de 0.5 a 14.5 (Bournay & UNEP/GRID Arendal, 2007).

La cubierta de los embalses, al igual que la de El Saltadero, está formada por una malla de sombreo de polietileno, insertado entre cordones de poliamida anclados a una viga perimetral lo que origina una cubierta “quasi horizontal” (Renz 2005). Ésta cubierta translúcida de color negro, deja pasar parte de la luz al interior del embalse pero proporcionándole un efecto sombreado que reduce la incidencia de la radiación solar en la geomembrana. Además, esta cubierta permite la entrada de agua procedente de las precipitaciones por los intersticios de la malla.



Figura 7.1. Vista panorámica del embalse de Ravelo.



Figura 7.2. Vista panorámica del embalse de San Lorenzo

7.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología experimental empleada fue la desarrollada por la norma europea UNE EN 13 361 (AENOR 2013) Las pruebas de resistencia al punzonamiento se llevaron a cabo según el método de ensayo desarrollado por el grupo del Área de Materiales del CEDEX (Blanco et al. 1996, AENOR 2011).

La microscopia óptica se llevó a cabo con un microscopio LEICA modelo DMRX, equipado con un sistema automático de fotografía y la microscopía electrónica fue realizada con un microscopio electrónico de barrido ZEISS, modelo EVO 50, equipado con un espectrómetro de dispersión de energía de rayos X OXFORD Instruments, modelo INCA Pentafet X3.

Todas las pruebas realizadas originalmente han superado los requerimientos mínimos exigidos a este tipo de geomembranas de acuerdo al Manual de balsas (MARM 2010) redactado por el CEDEX a petición del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

7.4. GEOMEMBRANAS DE EPDM

El estudio se ha realizado en la geomembrana instalada en la balsa de Los Dos Pinos, lámina expuesta a las radiaciones solares y Ravelo, lámina instalada en el embalse cubierto, en los 10 primeros años de su instalación.

La evolución de las características determinadas en las geomembranas de EPDM se presenta en la Tabla 7.1.

Los efectos de la fotooxidación en la degradación de la macromolécula del terpolímero, debido a la incidencia de la radiación solar, provocan un aumento del grado de reticulación en la lámina expuesta del embalse de Los Dos Pinos. Este efecto hace que la geomembrana presente una mayor dureza Shore A y resistencia a la tracción, sin embargo experimenta una disminución en el alargamiento en rotura y en el recorrido del punzón antes de perforar la geomembrana (Baba et al. 1999, Blanco et al. 2008a, 2014, 2016).

En cambio, la geomembrana del interior del embalse de Ravelo presenta mejores características en dureza Shore A, alargamiento en rotura y resistencia a la perforación. No obstante, muestra un peor comportamiento cuando se realiza la prueba de doblado a bajas temperaturas (-55°C), ya que se detectó la rotura del material a los 9 años de su instalación. Esto es, posiblemente, debido a la pérdida y oxidación de los aceites parafínicos que se encuentran en su formulación en proporciones superiores al 10%.

El estudio mediante microscopia óptica de reflexión en las dos geomembranas de EPDM muestra una superficie homogénea con leves síntomas de deterioro (Figura 7.3).

La microscopia electrónica de barrido indica un notable cuarteamiento con microgrietas en la geomembrana del embalse de Los Dos Pinos, sin cubrir, como consecuencia de la mayor degradación sufrida por la radiación solar (Figura 7.4). La superficie de la geomembrana del embalse de Ravelo, cubierto, es más homogénea sin la presencia de grietas ni fisuras. Asimismo se ha detectado la presencia de frústulas de microalgas de diatomeas en la geomembrana del embalse cubierto (Blanco et al. 2002, Soriano et al. 2012)

Tabla 7.1. Evolución de las características de las balsas de geomembranas de EPDM en los embalses de Los Dos Pinos y Ravelo a lo largo del tiempo.

BALSA	CARACTERÍSTICA	AÑOS DE INSTALACIÓN					
		0	2	5	6	9	10
Los Dos Pinos (Sin cubrir))							
	Resistencia a la tracción, MPa	9.6	10.5	9.5	9.4	10.1	10.2
	Esfuerzo al 300% de alargamiento, %	6.8	8.4	8.8	9.1	-	-
	Alargamiento en la carga máxima, %	489	422	366	309	288	293
	Dureza Shore A	66	73	69	72	73	73
	Resistencia a la perforación, N/mm						
	Cara externa	200	225	280	287	340	358
	Cara interna	203	225	243	279	298	347
	Recorrido del punzón antes de perforar, mm						
	Cara externa	38	32	33	32	31	30
	Cara interna	38	33	30	34	31	29
Ravelo (Cubierta)							
	Resistencia a la tracción, MPa	9.3	9.7	10.1	10.1	10.4	9.6
	Esfuerzo al 300% de alargamiento, %	6.7	8.1	8.8	8.2	8.9	8.0
	Alargamiento en la carga máxima, %	489	392	407	407	369	369
	Dureza Shore A	59	63	65	63	64	66
	Resistencia a la perforación, N/mm						
	Cara externa	201	247	247	246	217	264
	Cara interna	201	223	237	236	216	272
	Recorrido del punzón antes de perforar, mm						
	Cara externa	39	38	36	37	33	33
	Cara interna	39	34	35	37	30	34

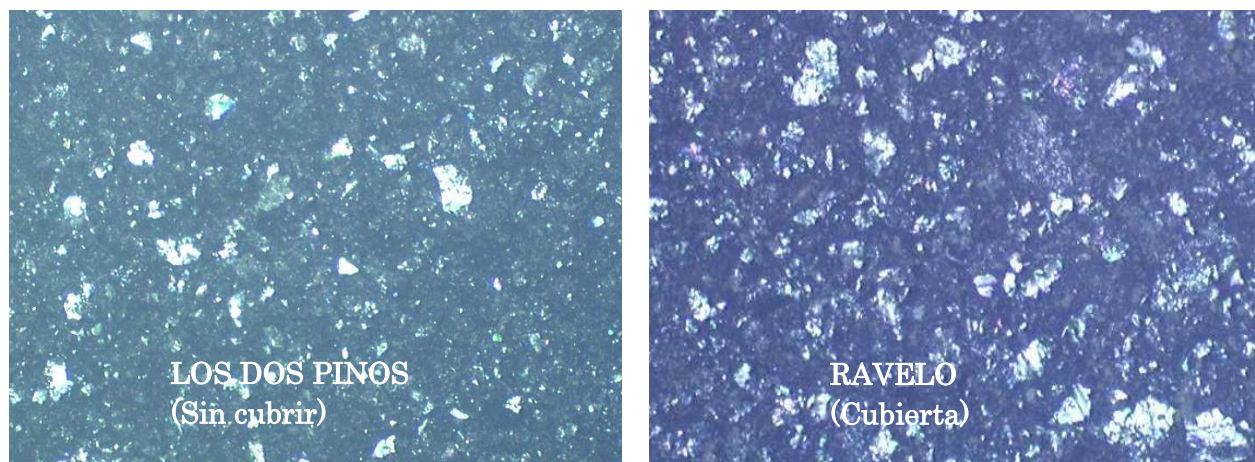


Figura 7.3. Microfotografías MOR 60x de la cara externa de las geomembranas de Los Dos Pinos y Ravelo.

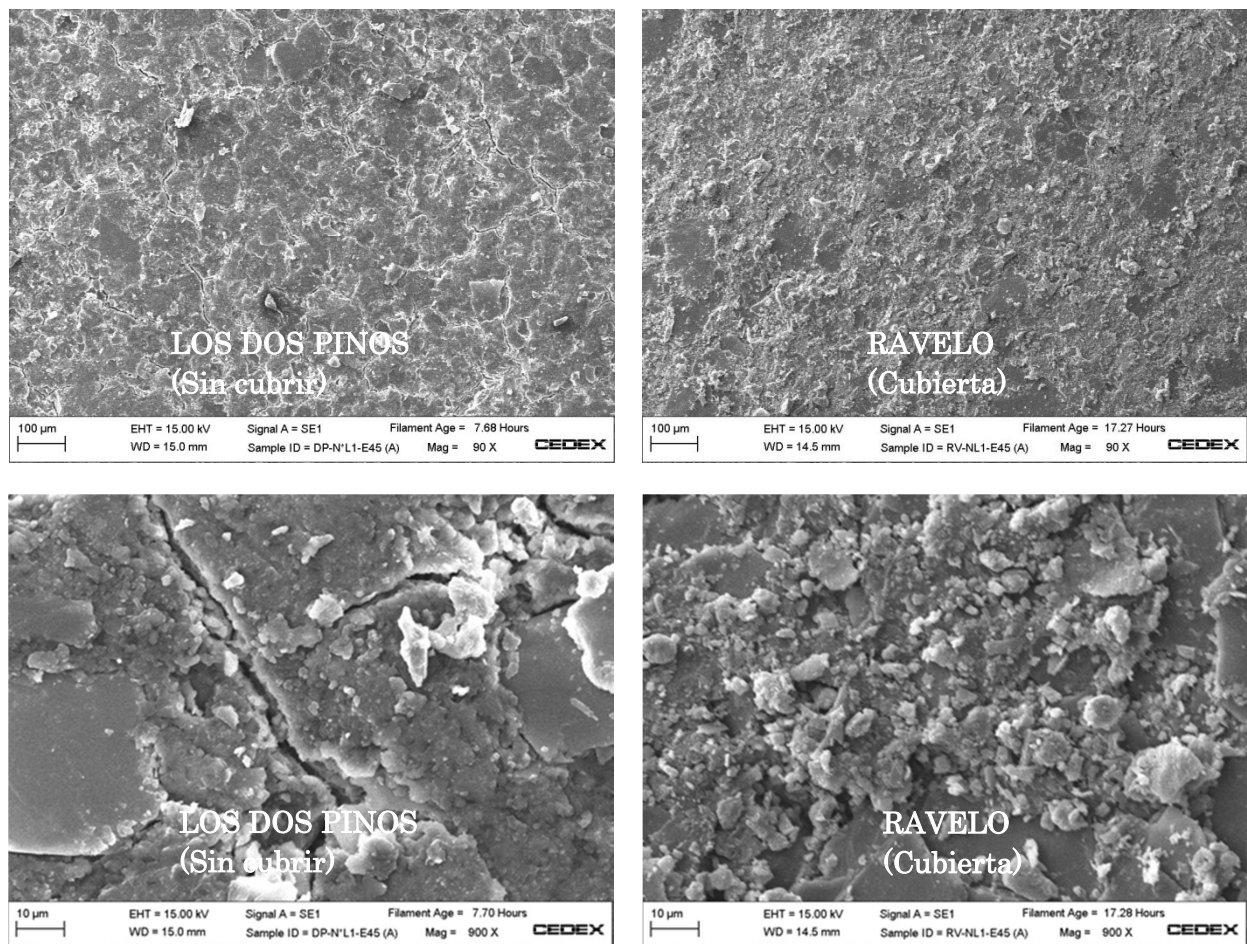


Figura 7.4. Microfotografías MEB a 90x y 900x de la cara externa de las geomembranas de Los Dos Pinos y Ravelo.

7.5. GEOMEMBRANAS DE PEAD

El estudio se ha realizado en la geomembrana procedente de la balsa de Cuatro Caminos, lámina expuesta, y de San Lorenzo, lámina instalada en la balsa cubierta, a lo largo de los 23 años de su puesta en obra.

La evolución de la resistencia a la tracción y el alargamiento en la rotura se expone en la Figura 7.5. Se aprecia que a lo largo de los 23 años, no se han encontrado cambios importantes en ninguna de las dos características mecánicas, siendo tanto la resistencia a la tracción como el alargamiento en la rotura superiores en la lámina expuesta a la radiación solar (Blanco et al. 2008b).

En cuanto a la resistencia a la perforación, los datos alcanzados se presentan en la Figura 7.6. En este caso los valores de la resistencia a la perforación y el recorrido del punzón antes de perforar son superiores en la geomembrana del embalse cubierto que en la expuesta a la intemperie.

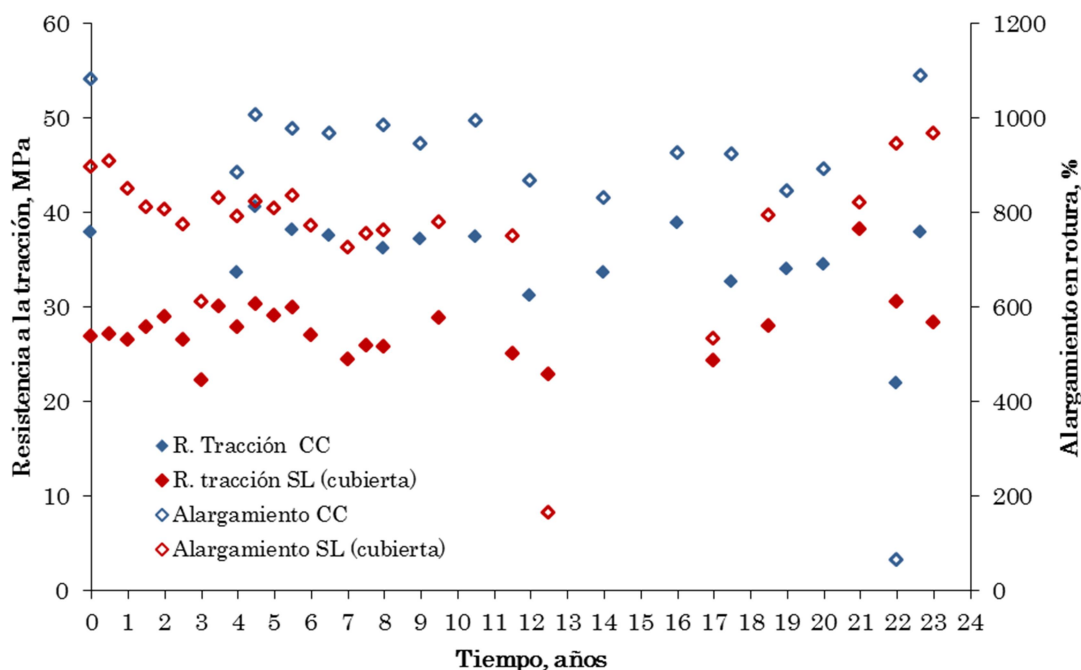


Figura 7.5. Evolución de las características de tracción y alargamiento a lo largo del tiempo de las geomembranas de Cuatro Caminos (CC) y de San Lorenzo (SL).

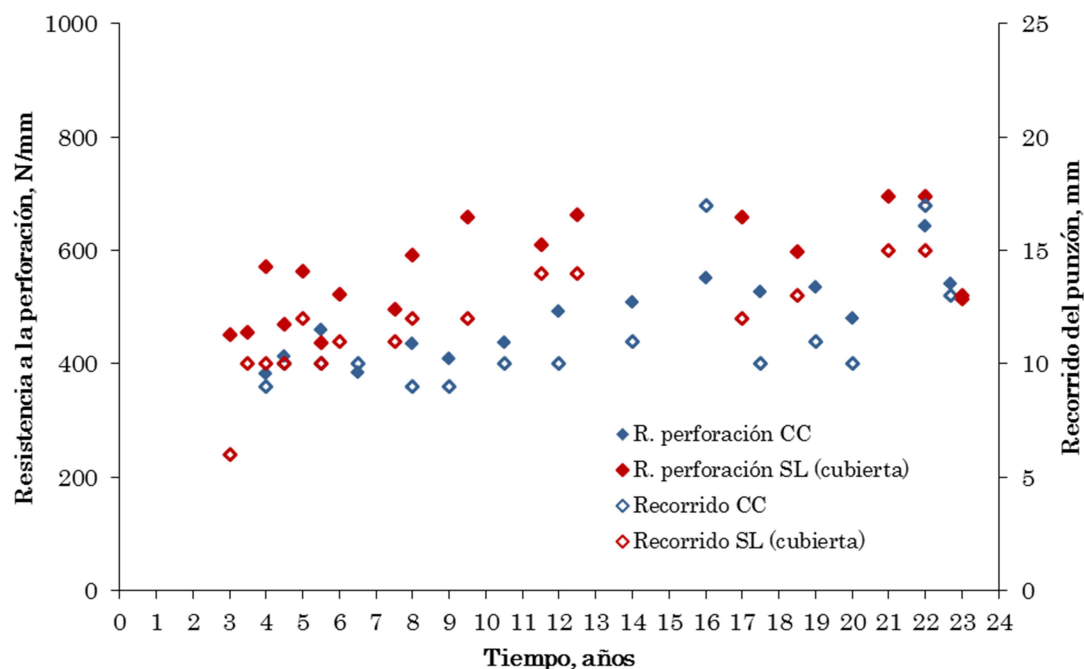


Figura 7.6. Evolución de la resistencia a la perforación y recorrido del punzón antes de perforar a lo largo del tiempo de las geomembranas de Cuatro Caminos (CC) y de San Lorenzo (SL).

En el seguimiento realizado a los 21 años desde la instalación de la geomembrana de Cuatro Caminos, se observó una serie de agrietamientos en la zona de coronación debidos al proceso de degradación de “stress cracking”. En cambio, este fenómeno no se ha detectado en la balsa de San Lorenzo donde la geomembrana se encuentra cubierta.

Asimismo se determinó el tiempo de inducción a la oxidación (TIO) con objeto de evaluar el estado de degradación de las dos geomembranas de PEAD.

Los datos obtenidos en las determinaciones de “stress cracking” y del tiempo de inducción a la oxidación, a los 23 años de la puesta en obra de las geomembranas se reflejan en la Tabla 7.2. La geomembrana de la balsa de Cuatro Caminos muestra unos valores inferiores a los obtenidos en la de San Lorenzo. Esto indica que la geomembrana de la balsa de Cuatro Caminos, expuesta a la radiación solar, presenta una mayor degradación a través del proceso de “stress cracking” como consecuencia de su menor contenido en antioxidantes, valor indicado a través del tiempo de inducción a la oxidación.

Tabla 7.2. Datos de Stress Cracking y Tiempo de Inducción a la Oxidación (TIO) después de 23 años de instalación.

Balsa	Stress Cracking, h		Tiempo de Inducción a la Oxidación (TIO), min
	Sentido Longitudinal	Sentido Transversal	
Cuatro Caminos (Sin cubrir)	30	19	14.0
San Lorenzo (Cubierta)	96	54	28.1

Las microfotografías realizadas por microscopía óptica de reflexión (MOR) a 60x y electrónica de barrido (MEB) a 90x y 900x, a los 23 años de la instalación de las geomembranas, se muestran en la Figura 7.7 y Figura 7.8, respectivamente.

Se aprecia una superficie homogénea en las microfotografías MOR a 60x en las dos geomembranas, no observándose alteraciones superficiales apreciables.

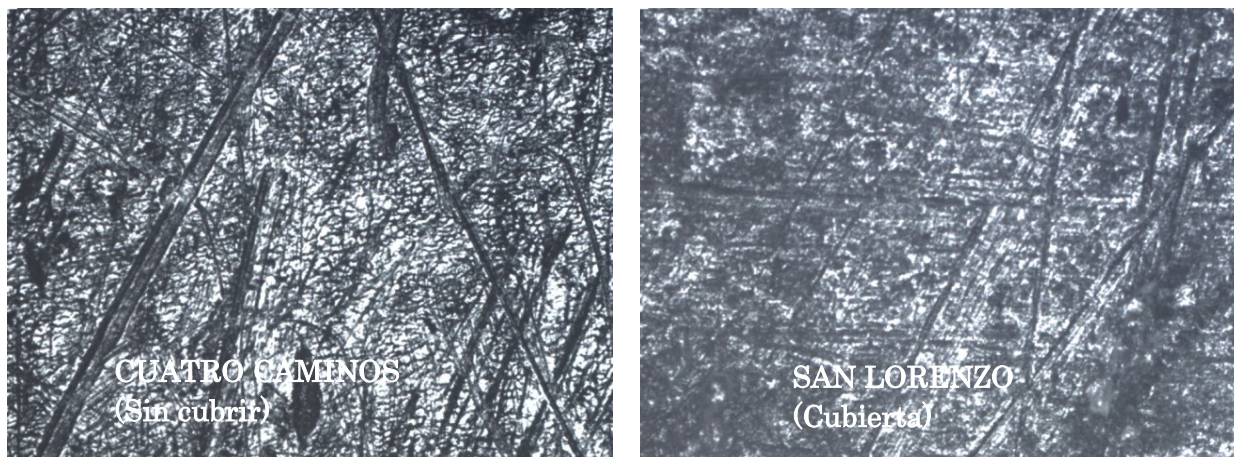


Figura 7.7. Microfotografías MOR a 60x de la cara externa de las geomembranas de Cuatro Caminos (CC) y de San Lorenzo (SL).

Las microfotografías realizadas por MEB a 90x y 900x muestran una superficie agrietada en ambas geomembranas, siendo más destacado el cuarteamiento detectado en la geomembrana expuesta a la intemperie en el embalse de Cuatro Caminos.

En la geomembrana de San Lorenzo se aprecian estrías causadas por el contacto con el terreno así como la presencia de microporos como alteraciones superficiales de escasa importancia.

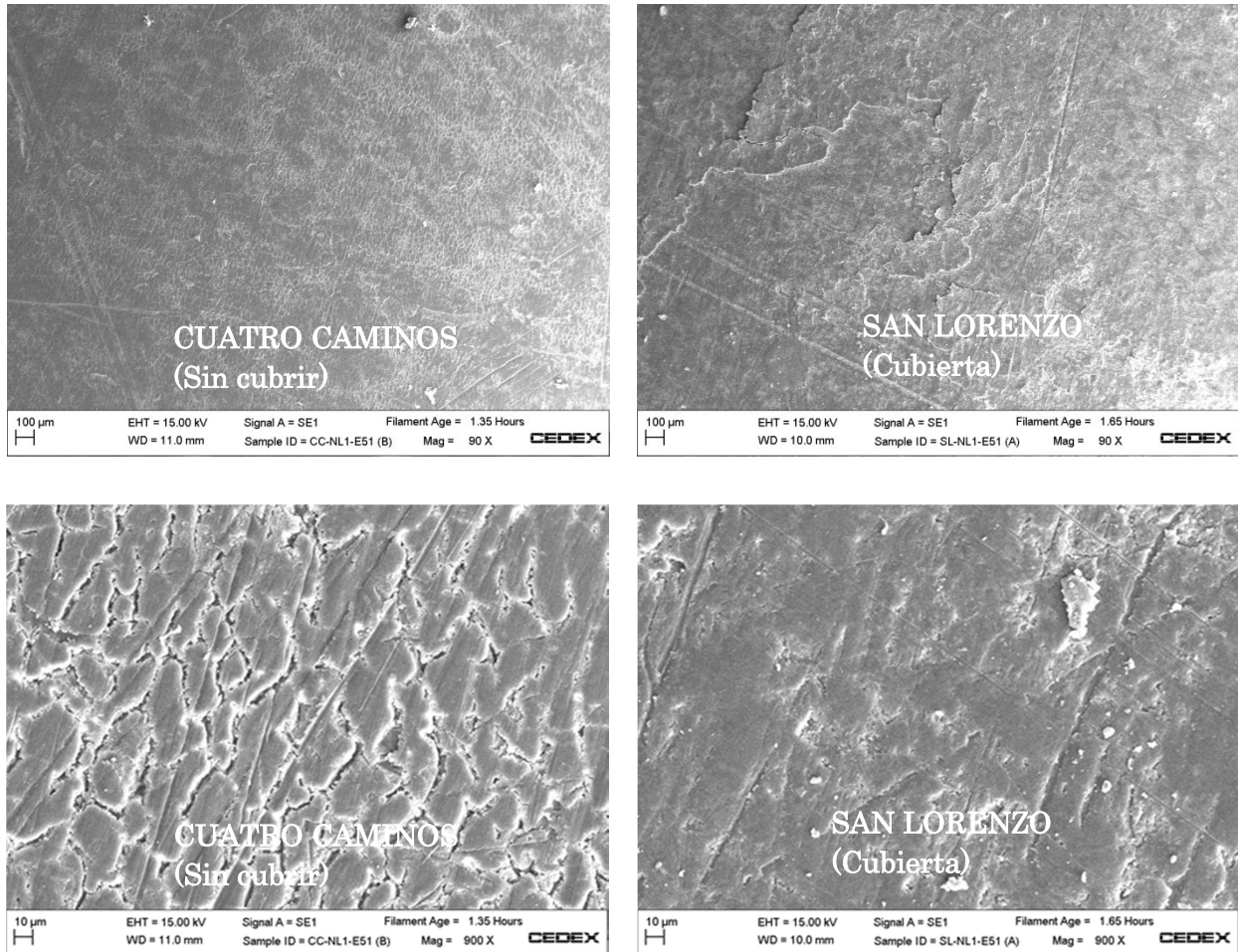


Figura 7.8. Microfotografías MEB a 90x y 900x de la cara externa de las geomembranas de Cuatro Caminos (CC) y San Lorenzo (SL).

7.6. CONCLUSIONES

De todo lo expuesto se deduce que las geomembranas de EPDM y PEAD presentan un comportamiento mejor en los embalses que se encuentran protegidos por la cobertura de sombreo.

El análisis de las características físicas, mecánicas y microscópicas ha conducido a las conclusiones que se mencionan a continuación.

7.6.1. GEOMEMBRANAS DE EPDM

La geomembrana expuesta a la intemperie, embalse de Los Dos Pinos, ha sufrido las consecuencias de la radiación solar lo que da lugar a un aumento de su dureza y la resistencia a la perforación y una disminución del alargamiento en rotura. Esta evolución en sus características se debe a la influencia de la radiación solar en la geomembrana, lo que provoca el entrecruzamiento del material polimérico como consecuencia de su fotooxidación.

La geomembrana no expuesta, embalse de Ravelo, presenta mejores características de dureza y perforación así como un mejor comportamiento frente al alargamiento en rotura.

7.6.2. GEOMEMBRANAS DE PEAD

Las características mecánicas determinadas en la geomembrana expuesta a la intemperie y en la situada en el interior del embalse cubierto, a lo largo de los 23 años de su instalación, no han presentado cambios importantes.

La mayor diferencia detectada se ha puesto de manifiesto en los resultados de stress-cracking y en el tiempo de inducción a la oxidación. La geomembrana expuesta a la radiación solar en el embalse de Cuatro Caminos presenta unos valores inferiores en stress-cracking y en el tiempo de inducción a la oxidación, lo que indica que la geomembrana expuesta a la radiación solar ha experimentado una mayor degradación debido a la pérdida de los antioxidantes presentes en la misma.

7.7. BIBLIOGRAFÍA

AENOR (2011) *UNE 104317, Impermeabilización. Determinación del recorrido del punzón antes de la perforación en geomembranas sintéticas impermeabilizantes instaladas en balsas.*

AENOR (2013) *UNE EN 13361, Barreras geosintéticas. Requisitos para su utilización en la construcción de embalses y presas.*

Baba, M., Gardette, J. L. y Lacoste, J. (1999). *Crosslinking on ageing of elastomers: I. Photoageing of EPDM monitored by gel, swelling and DSC measurements*. Polymer degradation and stability, **63**, 121-126.

Blanco, M. (2012). *Spanish experience in the use of synthetic geomembranes for hydraulic works*. Keynote Lecture, in Blanco et al. (Eds.) Eurogeo5, Ed. R. B. Servicios Editoriales, S. L. : 7-23 (electronic proceedings) Vol. 1: XXI-XXXIX (printed volumes).

Blanco, M.; Aguiar, E.; Cea, J. C. de; Castillo, F. y Soriano, J. (2008b). *Estado de las geomembranas sintéticas de polietileno de alta densidad (PEAD) a los siete años de su instalación en balsas*. Ingeniería Civil, **151**, 49-60.

Blanco, M., Castillo, F., Noval, A. M., Aguiar, E., Vara, T. Amat, B., Touze-Foltz, N. y Farcas, F. (2016). *Long term behavior and life expectancy of EPDM geomembranes installed in water reservoirs*. Eurogeo6. 403-416. Ljubljana, septiembre.

Blanco, M., Castillo, F., Touze-Foltz, N., Amat, B. y Aguiar, E. (2014). *Behaviour of EPDM geomembrane 18 years after its installation in a water reservoir*. 4th International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment.

Blanco, M., Cuevas, A., Castillo, F. y Aguiar, E. (1996). *Puesta a punto de una nueva metodología experimental para la determinación de la resistencia a la perforación de geomembranas sintéticas*. Ingeniería Civil **103**, 65-69.

Blanco, M., Noval, A.M., Solera, R., Castillo, F., Aguiar, E., Vara, T., Pargada, L. Rico, G. y Giroud, J.P. (2013). *Comportamiento de la misma geomembrana de PVC-P instalada a la intemperie y en un embalse cubierto*. Proceedings. Congreso Geosintec Iberia 1, 114-119.

Blanco, M., Soriano, J., Aguiar, E. y Zaragoza, G. (2002). *Análisis microscópico de geomembranas sintéticas utilizadas en la impermeabilización de embalses*. Ingeniería Civil: **127**, 51-59.

Blanco, M.; Aguiar, E.; Cea, J.C. de; Soriano, J.; Castillo, F.; García, F. y Crespo, M.A. (2008a). *Comportamiento de geomembranas de etileno-propileno-monómero diénico (EPDM) empleadas en la impermeabilización de balsas*. Proc. 2º Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación y Obra Pública y 2º Congreso Internacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas. 289-298.

Bournay, E. & UNEP/GRID Arendal. (2007). *The global solar UV index*. Vital Ozone Graphics, 28.

Crespo, M. A. (2011). *Comportamiento de barreras geosintéticas poliméricas (GBR-P) a base de poli(cloruro de vinilo) plastificado de distinta formulación, instaladas en embalses*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2010). *Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas*. Ed. Comité Nacional Español de Grandes Presas.

Noval, A. M., Blanco, M., Castillo, F., Leiro, A., Mateo, B., Zornberg, J. G., Aguiar, E., Torregrosa, J. B. y Redón, M. (2014). *Long-term performance of the HDPE geomembrane at the "San Isidro" reservoir*. 10th International Conference on Geosynthetics. Berlin, septiembre.

Renz, O. (2005) *Balsas cubiertas*. I Simposio Nacional sobre Proyecto, Construcción e Impermeabilización de Balsas. Sevilla, noviembre.

Soriano, J., Blanco, M., García, M. A., Leiro, A., Mateo, B., Burgos, J., Aguiar, E. y Rubín de Célix, M. (2012). *Optical and scanning electron microscopy as advanced analysis methods to determine the condition of synthetic geomembranes*, in Blanco et al. (Eds.) Eurogeo5, Ed. R. B. Servicios Editoriales, S. L.: Vol. 2, 266-273 (electronic proceedings) Vol. 1: 475-482 (printed volumes).

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado el comportamiento de la geomembrana de PVC que forma parte del sistema de impermeabilización de la balsa cubierta de El Saltadero y de la misma geomembrana instalada al exterior, en el campo experimental.

El seguimiento realizado a lo largo de 16 años ha permitido establecer la tendencia que experimenta el comportamiento de las dos geomembranas aplicadas en entornos diferentes, como son el interior de la balsa de El Saltadero (geomembrana cubierta) y el exterior, en el campo experimental (geomembrana expuesta a la intemperie).

Las propiedades de las geomembranas de PVC derivan del porcentaje de resina y aditivos presentes en su composición. De todos los aditivos, los plastificantes son los que desempeñan una función muy importante, en cuanto a las variaciones de las características físicas y mecánicas del PVC.

No obstante, el contenido en plastificantes es una de las características que se ve muy afectada por la exposición de la geomembrana a los agentes atmosféricos. Por este motivo, la variación del contenido en plastificantes, en particular su disminución, representa un índice significativo de la degradación del PVC-P, ya que pone de manifiesto la pérdida de propiedades que fueron alcanzadas gracias a su adición en la formulación de las geomembranas.

Asimismo, se ha llevado a cabo el estudio en las geomembranas de polietileno de alta densidad (PEAD) y caucho terpolímero de etileno-propileno-dieno (EPDM) instaladas en embalses cubiertos y en embalses comunes, en los que la geomembrana está expuesta a la radiación solar.

Con objeto de comparar el comportamiento de las geomembranas de EPDM, se ha seleccionado el embalse cubierto de Ravelo y el embalse sin cubrir de Los Dos Pinos, mientras que para comparar las geomembranas de PEAD se ha seleccionado el embalse cubierto de Valle de San Lorenzo y el embalse sin cubrir de Cuatro Caminos.

Las principales conclusiones obtenidas del presente trabajo son las siguientes:

Geomembranas de PVC

Los plastificantes identificados, en las dos geomembranas de PVC, han sido el ftalato de didecilo y el ftalato de isodecilundecilo. El peso molecular medio de los plastificantes es de 448 g/mol, valor superior a 400 g/mol, que es el indicado por el “PVC Geomembrane Institute” y por el “Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas” para proporcionar una mayor durabilidad de las geomembranas de PVC.

La pérdida de plastificantes en la geomembrana de PVC instalada en la balsa cubierta de El Saltadero es superior a la detectada en la geomembrana del campo experimental, expuesta a la intemperie.

La tendencia observada en las características mecánicas de las geomembranas de PVC ha mostrado un aumento de la resistencia a la tracción, resistencia a la perforación y resistencia de la soldadura por tracción. Esta tendencia es más acusada en la geomembrana instalada en el interior de la balsa que en la del campo experimental. Este efecto es debido a la pérdida de flexibilidad y aumento de la rigidez, como consecuencia de la pérdida de plastificantes: 63.2% en la geomembrana de la balsa cubierta de El Saltadero y 37.5% en la del campo experimental.

Asimismo, la degradación de las geomembranas se ha puesto de manifiesto a través de los resultados obtenidos en la prueba de doblado a bajas temperaturas, detectándose que la instalada en la balsa cubierta de El Saltadero ha experimentado la rotura a los 14 años de su puesta en obra. Sin embargo, la geomembrana situada a la intemperie, en el campo experimental, solamente ha sufrido grietas a los 16 años de su colocación.

El estudio realizado mediante microscopía óptica y electrónica permite observar la textura y morfología de las geomembranas, así como detectar alteraciones en la superficie de la misma y que no son visibles por otros procedimientos. La información aportada por estas dos técnicas ha permitido detectar que la resina polimérica de la geomembrana del campo experimental se encuentra más degradada que la de la balsa de El Saltadero. Esto se ha puesto de manifiesto en la aparición de grietas en la geomembrana del campo experimental a los 11 años de su puesta en obra y que han ido avanzando en profundidad a lo largo del tiempo debido a la acción de las radiaciones solares. Por el contrario, la geomembrana de la balsa cubierta de El Saltadero no se encuentra tan degradada superficialmente.

Finalmente se puede concluir que, contrariamente a lo que cabría esperar, el mejor comportamiento de la geomembrana de PVC corresponde a la ubicada en el campo experimental situado en el recinto del embalse y no a la instalada en el interior del embalse cubierto. Este hecho se debe a que la geomembrana del campo experimental ha sufrido la degradación superficial debida a la radiación ultravioleta mientras que la del interior del embalse presenta una degradación debida a la mayor pérdida de plastificantes como consecuencia del microclima creado en el interior del citado embalse.

Geomembranas de PEAD

Las características mecánicas determinadas en la geomembrana expuesta a la intemperie y en la situada en el interior del embalse cubierto, a lo largo de los 23 años de su instalación, no han presentado cambios importantes.

Sin embargo la mayor diferencia detectada entre las dos geomembranas se ha puesto de manifiesto en los resultados de stress-cracking y en el tiempo de inducción a la oxidación. La lámina expuesta a la radiación solar en el embalse de Cuatro Caminos presenta unos valores inferiores en stress-cracking y en el tiempo de inducción a la oxidación, lo que indica que dicha lámina ha experimentado una mayor degradación probablemente debida a la pérdida de los antioxidantes presentes en la misma.

Los resultados obtenidos indican que la geomembrana del embalse cubierto de Valle de San Lorenzo presenta un comportamiento mejor que la del embalse de Cuatro caminos.

Geomembranas de EPDM

La geomembrana expuesta a la intemperie, embalse de Los Dos Pinos, ha experimentado un aumento de la resistencia a la perforación, de la dureza Shore A y a una disminución del alargamiento en rotura a lo largo del tiempo. Por el contrario, la geomembrana del embalse cubierto de Ravelo presenta mejores características de dureza y resistencia a la perforación, así como un mejor comportamiento frente al alargamiento en rotura.

La microscopia electrónica de barrido ha mostrado un notable cuarteamiento con abundantes microgrietas en la geomembrana del embalse sin cubrir de Los Dos Pinos, mientras que la superficie de la lámina del embalse cubierto de Ravelo es más homogénea sin la presencia de grietas ni fisuras.

Estos resultados indican que la radiación procedente del sol ha degradado el polímero de EPDM provocando el entrecruzamiento del material polimérico como consecuencia de su fotooxidación.

Los resultados obtenidos indican que la geomembrana del embalse cubierto de Ravelo presenta un mejor comportamiento que la del embalse de Los Dos Pinos.

